



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

**MANTENIMIENTO DE TURBINA DE VAPOR EN CENTRAL  
TERMOELÉCTRICA DEL INGENIO TULULÁ**

**Diego Rafael Chacón Torres**

Asesorado por el Ing. Edwin Estuardo Sarzeño Zepeda

Guatemala, marzo de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MANTENIMIENTO DE TURBINA DE VAPOR EN CENTRAL  
TERMOELÉCTRICA DEL INGENIO TULULÁ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**DIEGO RAFAEL CHACÓN TORRES**

ASESORADO POR EL ING. EDWIN ESTUARDO SARZEÑO ZEPEDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, MARZO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Anibal Chicojay
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortiz
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Figueroa Vásquez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **MANTENIMIENTO DE TURBINA DE VAPOR EN CENTRAL TERMOELÉCTRICA DEL INGENIO TULULÁ**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 7 de abril de 2014

**Diego Rafael Chacón Torres**



FACULTAD DE INGENIERIA

UNIDAD DE EPS

Guatemala, 21 de enero de 2015  
REF.EPS.DOC.40.01.15.

Ing. Silvio José Rodríguez Serrano  
Director Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Rodríguez Serrano.

Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Diego Rafael Chacón Torres** de la Carrera de Ingeniería Mecánica, con carné No. 200915661, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **MANTENIMIENTO DE TURBINA DE VAPOR EN CENTRAL TERMOELÉCTRICA DEL INGENIO TULULÁ.**

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda  
Asesor-Supervisor de EPS  
Área de Ingeniería Mecánica



c.c. Archivo  
EESZ/ra



Guatemala, 21 de enero de 2015  
REF.EPS.D.28.01.15

Ing. Julio César Campos Paiz  
Director Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Campos Paiz:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado: **MANTENIMIENTO DE TURBINA DE VAPOR EN CENTRAL TERMOELÉCTRICA DEL INGENIO TULULÁ**, que fue desarrollado por el estudiante universitario **Diego Rafael Chacón Torres** quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero Edwin Estuardo Sarceño Zepeda.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor - Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,  
"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Silvio José Rodríguez Serrano  
Director Unidad de EPS



SJRS/ra



**USAC**  
TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.Mecanica.86.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, con la aprobación del Coordinador del Área de Complementaria, del trabajo de graduación titulado **MANTENIMIENTO DE TURBINA DE VAPOR EN CENTRAL TERMOELÉCTRICA DEL INGENIO TULULÁ**, del estudiante **Diego Rafael Chacón Torres**, procede a la autorización del mismo.

***"Id y Enseñad a Todos"***

Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera  
Director a.i.  
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, marzo de 2015





DTG. 110 .2015

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **MANTENIMIENTO DE TURBINA DE VAPOR EN CENTRAL TERMOELÉCTRICA DEL INGENIO TULULÁ**, presentado por el estudiante universitario: **Diego Rafael Chacón Torres**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Rečinos  
Decano

Guatemala, 13 de marzo de 2015

/gdech





## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

La fuerza que me impulsa a seguir adelante, que me ayuda a superar cualquier reto y quien bendice mi camino.

### **Mis padres**

Roberto Chacón y Griselda Torres, quienes me enseñaron a luchar, me dieron todas las herramientas necesarias para afrontar la vida y acompañarme a superar los obstáculos.

### **Mis hermanos**

Daniel, Luis Carlos y Roberto Chacón, gracias a ellos nunca estuve solo en mi camino, ellos me ayudaron a dar cada paso.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por ser una institución prestigiosa y reconocida a nivel nacional e internacional, la cual ha permitido mi desarrollo como profesional capacitado para competir en el mercado laboral.

**Facultad de Ingeniería**

Lugar en el cual he tenido la oportunidad de capacitarme como ingeniero, agradeciendo todas las herramientas brindadas para formarme como un profesional con principios y conocimientos necesarios en el mundo actual.

**Ingenio Tululá. S. A.**

Por la oportunidad brindada para llevar a cabo este trabajo de graduación y permitirme formar parte de la empresa para poner en práctica los conocimientos adquiridos.

**Ing. José Luis Palacios**

Gracias por el apoyo incondicional, por compartir sus conocimientos y así poder aplicarlos para realizar este proyecto y darme el apoyo necesario para llevarlo a cabo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XV
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Descripción de la empresa .....	1
1.2. Planteamiento del problema .....	2
1.3. Antecedentes.....	3
1.4. Justificación .....	3
1.5. Formulación y delimitación del problema.....	4
1.6. Alcance y limitaciones .....	4
1.7. Objetivos.....	5
1.7.1. Generales .....	5
1.7.2. Específicos .....	5
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	7
2.1. Calderas .....	7
2.1.1. Clasificación de las calderas.....	7
2.2. Turbinas de vapor.....	10
2.2.1. Tipos de turbinas de vapor .....	11
2.2.1.1. Primeras turbinas de vapor.....	11
2.2.1.2. Tipos de turbinas .....	13

2.2.2.	Principales elementos de una turbina de vapor.....	16
2.3.	Ciclo Rankine .....	22
2.4.	Combustible .....	26
2.4.1.	Tipos .....	27
2.4.1.1.	Carbón.....	27
2.4.1.2.	Bunker.....	28
2.4.1.3.	Biocombustibles .....	30
3.	AHORRO ENERGÉTICO.....	33
3.1.	¿Qué es el ahorro energético?.....	33
3.2.	Medida de ahorro energético .....	33
3.2.1.	Instalaciones eléctricas .....	33
3.2.2.	Motores eléctricos .....	35
3.2.3.	Iluminación .....	36
3.2.4.	Computadoras.....	37
3.2.5.	Aire acondicionado.....	38
3.2.6.	Compresores.....	39
3.2.7.	Sistemas de bombeo.....	40
3.2.8.	Buena práctica de consumo energético .....	41
4.	FASE DE SERVICIO TÉCNICO PROFESIONAL .....	43
4.1.	Descripción general.....	43
4.2.	Averías principales .....	43
4.3.	Mantenimiento de la turbina .....	54
4.3.1.	Desmontaje .....	54
4.3.1.1.	Aislante térmico.....	54
4.3.1.2.	Procedimiento desmontaje .....	54
4.3.1.3.	Desmontaje válvulas de control principal y carcasa.....	56

4.3.2.	Estado de álabes .....	59
4.3.3.	Calibración de cojinetes radiales (chumaceras) .....	62
4.3.4.	Cojinete axial .....	66
4.3.5.	Comprobación desgaste collar de empuje.....	69
4.3.6.	Desplazamiento axial de la turbina .....	73
4.3.7.	Sellos laberínticos.....	74
4.3.8.	Sistema de volteo .....	77
4.3.9.	Sistema hidráulico .....	78
4.3.10.	Válvulas de control principal .....	80
4.3.11.	Sistema de lubricación.....	83
4.3.12.	Válvula de cierre rápido .....	85
CONCLUSIONES .....		87
RECOMENDACIONES .....		89
BIBLIOGRAFÍA.....		91
ANEXOS .....		93



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Esférica metálica con toberas .....	12
2.	Chorro de vapor .....	13
3.	Partes de una turbina .....	17
4.	Diagrama ciclo Rankine .....	25
5.	Calentamiento del perno .....	55
6.	Manejo de válvula .....	56
7.	Válvula de control de vapor .....	57
8.	Carcasa superior de la turbina .....	58
9.	Álabes móviles .....	59
10.	Limpieza a presión de álabes y diafragmas .....	60
11.	Estado de álabes móviles etapa de alta presión .....	61
12.	Álabes de baja presión.....	62
13.	Limpieza y calibración de chumacera .....	66
14.	Cojinete axial inactivo.....	67
15.	Cojinete axial activo .....	68
16.	Collar de empuje axial.....	69
17.	Puntos de medición collar de empuje axial .....	70
18.	Soportes y cilindro hidráulico para determinar empuje axial .....	73
19.	Reloj comparador .....	74
20.	Sellos de turbina .....	75
21.	Sistema de volteo.....	77
22.	Central hidráulica .....	79
23.	Válvulas de control principal de vapor.....	81



24.	Asiento válvulas .....	81
25.	Cilindro hidráulico de control de vapor.....	82
26.	Bomba de aceite de lubricación y sus partes.....	84
27.	Válvula de cierre rápido .....	86

## TABLAS

I.	Holgura chumacera 1.....	64
II.	Holgura chumacera 2.....	64
III.	Holgura chumacera 3.....	65
IV.	Desgaste en collar de empuje axial .....	71
V.	Holgura de sellos .....	76

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>BTU/Lb</b>	British Thermical Unit por libra. Unidad de medida de energía en el sistema inglés.
<b>BTU</b>	British Thermica Unit. Unidad de medida de la energía en el sistema inglés, por sus siglas en inglés.
<b>Gpm</b>	Galones por minuto, medida del caudal de un líquido.
<b>CO2</b>	Gas oxido de carbono.
<b>Gwh</b>	Giga-watt-hora, unidad de potencia eléctrica.
<b>Bx</b>	Grados Brix.
<b>°F</b>	Grados Fahrenheit Medida de temperatura .
<b>HP</b>	Horse Power Unidad de medida de la potencia de un motor eléctrico, por sus siglas en inglés Horse Power.
<b>Kw</b>	Kilo-watt, medida que hace referencia a la potencia eléctrica.

<b>Lb/Hr</b>	Libras por hora Flujo de vapor medido.
<b>Lb/t</b>	Libra por tonelada métrica, Unidad de rendimiento.
<b>Mw</b>	Mega-watt dimensional de potencia eléctrica.
<b>PSI</b>	Pound Square Inch Dimensional de la presión manométrica, por sus siglas en inglés (libras por pulgada cuadrada).
<b>Rpm</b>	Revoluciones por minuto.
<b>T-S</b>	Temperatura vs. Entropía. Diagrama.

## **GLOSARIO**

<b>Bagazo</b>	Desecho fibroso subproducto de la caña de azúcar.
<b>Cogeneración</b>	Producción secuencial de energía eléctrica o mecánica y calor útil, a partir del mismo combustible.
<b>Damper</b>	Regulador de entrada de los gases a los ventiladores.
<b>Ingenio</b>	Planta agro industrial donde se procesa la caña para producir azúcar y sus derivados.
<b>Olote de maíz</b>	Corazón de la mazorca de maíz una vez desgranada.
<b>Turbogenerador</b>	Hace referencia a la unión de una turbina con un generador eléctrico.
<b>Zafra</b>	Nombre que se asigna al período de duración de la producción de azúcar y sus derivados.



## **RESUMEN**

Adquirir conocimiento de las operaciones y funcionalidades de los procesos, mecanismos y equipos que hay en el área de cogeneración es importante, para llevar a cabo un ejercicio de práctica supervisada debidamente correcta, para lograr cumplir todas las expectativas tanto para la empresa como para la realización del proyecto, para lo cual, el primer mes se ocupará en conocer todo el proceso en el área de cogeneración así como todos los procedimientos de mantenimiento y funcionamiento de calderas, bombas, turbogeneradores así como otros equipos importantes.

El proyecto está enfocado en el mantenimiento y análisis del estado actual del turbogenerador, así como la causa de posibles fallas en los componentes más importantes, como lo son los cojinetes axiales, radiales, el equipo de volteo, el sistema hidráulico, los álabes, entre otros.

Se describen también las partes o componentes del equipo en cuestión, así como los parámetros actualmente utilizados en la central termoeléctrica, como lo son las tolerancias, parámetros de operación, estados permisibles entre otros.





## **OBJETIVOS**

### **General**

Diseño de un plan de mantenimiento para una turbina de vapor en central termoeléctrica del Ingenio Tululá.

### **Específicos**

1. Identificar las necesidades de mantenimiento en la turbina de vapor.
2. Describir los procedimientos de mantenimiento para la turbina de vapor.
3. Determinar los estándares de mantenimiento de la turbina de vapor.



## INTRODUCCIÓN

La industria azucarera forma parte del sector agroindustrial, muy importante en el desarrollo económico del país, encargándose de procesar la caña para producir azúcar y sus derivados. En este proceso se generan subproductos, entre ellos el bagazo de la caña de azúcar que es utilizado como combustible en las calderas, que proporciona el vapor y electricidad al ingenio, por medio de su sistema cogenerador.

Guatemala cuenta con una diversidad de tecnología en la producción de energía, como las turbinas de gas, las geotérmicas, las plantas hidráulicas, las turbinas de vapor, los motores reciprocantes y cogeneradores, todos ellos contribuyen en la generación de la carga necesaria a las necesidades del país. Al hablar de cogeneración se refiere a la producción secuencial de energía eléctrica o mecánica y calor útil, a partir del mismo combustible. La principal ventaja es la alta eficiencia térmica y las bajas emisiones, comparadas con los sistemas independientes de generación de electricidad y calor.

Al inicio de la década de 1970 comenzó a utilizarse el bagazo de caña como combustible en las calderas. Para economizar vapor, los ingenios se volvieron no solo más eficientes, sino también autosuficientes en energía térmica y eléctrica. Fue hasta en abril de 1994, que los ingenios Santa Ana, Concepción, Pantaleón, Magdalena y La Unión suscribieron contratos formales de despacho de energía con la Empresa Eléctrica de Guatemala, S. A., hasta por 170 megavatios (MW).

.

## **1. GENERALIDADES**

### **1.1. Descripción de la empresa**

A continuación se presenta la información general de la empresa, el lugar de ubicación, encargado del proyecto, tipo de institución.

- Nombre de la empresa: Industrias Licoreras de Guatemala, Ingenio Tululá
- Institución: privada
- Encargado del proyecto
  - Nombre: ingeniero José Luis Palacios
  - Puesto: jefe de Maquinaria del Área de Cogeneración
  - Teléfono: 7879-1000 Ext. 5104
- Situado en el municipio de San Andrés, Villa Seca en el departamento de Retalhuleu. Se dedica a la siembra, cultivo, corte y molienda de caña de azúcar obteniendo como resultado mieles vírgenes que son la materia prima para la elaboración de los rones añejos. El Ingenio Tululá está comprometido a entregar de manera sustentable los mejores productos y servicios a sus clientes aportando desarrollo y calidad de vida a la comunidad.

- Misión: satisfacemos los gustos más exigentes alrededor del mundo con los rones añejos y otros productos, de la más alta calidad y excelencia, innovando constantemente con un equipo comprometido a una rentabilidad y crecimiento sostenido, con responsabilidad social.
- Visión: ser la organización líder en la elaboración y comercialización de los más finos rones añejos y otros productos, para el mundo que disfruta de la excelencia.

## **1.2. Planteamiento del problema**

Asegurar el buen funcionamiento del turbogenerador, ya que es un equipo crítico que estará en constante funcionamiento en el período de zafra, y del cual depende la generación de energía para consumo interno en la empresa así como para venta a la red eléctrica del país. Realizar una inspección al estado actual del turbogenerador es de importancia, ya que un paro en el proceso de generación significaría un gasto significativo para la empresa, así como una pérdida de vapor entre los cambios de arranque y paro de operación.

La problemática que se trata es eliminar las diferencias existentes en la operación del equipo causan reprocesos y daños al equipo, asimismo mejorar el control y operación de la turbina ante daños frecuentes en el turbogenerador.

### **1.3. Antecedentes**

La generación de energía eléctrica utilizando recursos renovables es una alternativa a la utilización de combustibles fósiles, ya que la combustión a partir de biomasa tiene como resultado un menor costo de inversión y una reducción de daño al medio ambiente, por los gases de combustión que se producen dentro de la caldera.

Actualmente en el Ingenio Tululá, se genera vapor y electricidad utilizando bagazo de caña, que resulta ser el residuo de la molienda en el proceso de obtención de jugo que servirá posteriormente para el proceso de azúcar.

La mayoría de ingenios en Guatemala generan electricidad tanto para uso en la planta como para venta a partir de biomasa, en este caso, bagazo de caña, ya que hace tiempo esto resultaba ser un desperdicio de energía renovable y que en la actualidad se está utilizando de la mejor forma, para generar vapor para procesos y electricidad a un menor costo que utilizando combustibles fósiles.

### **1.4. Justificación**

Considerando la actual situación competitiva por la que atraviesa la industria por mantenerse y sobresalir en el mercado, es relevante tener todos los procesos del sistema de cogeneración y producción en un ingenio bajo un estricto control de calidad ya que asegurando una estabilidad en los procesos productivos, se suministra a los clientes internos y externos un producto o servicio libre de defectos, logrando a la vez que se entregue un producto de calidad. Solamente con la participación activa de ser un grupo de trabajo en las



actividades y realizando mejoras a los equipos ya existentes, se estará haciendo más eficiente el comportamiento de los procesos. Siendo esta la única opción de lograr que la vida de la empresa no se reduzca, generar oportunidades de trabajo, generar utilidades y se asegura un buen funcionamiento del sistema.

### **1.5. Formulación y delimitación del problema**

El proyecto está limitado por el tiempo requerido para inspeccionar y reparar los componentes dañados en el turbogenerador, ya que el tiempo de reparación es bastante limitado y se debe aprovechar para asegurar que el inicio de la siguiente zafra, el equipo de generación esté en su mejor estado posible para garantizar un buen funcionamiento con los menores daños posibles.

### **1.6. Alcance y limitaciones**

El proyecto depende del plan de mantenimiento de la empresa, así como la disposición del personal a cargo, ya que diversos equipos requieren reparación y se debe distribuir el tiempo y el personal para no omitir el mantenimiento de dichos equipos importantes.

No contar con procesos estandarizados para llevar a cabo el mantenimiento del turbogenerador, significaría confiar en la experiencia del personal a cargo de la operación y mantenimiento, ya que de ese modo se conocerán los procedimientos a seguir para llevar a cabo el mantenimiento de la mejor forma posible y en el menor tiempo.

## **1.7. Objetivos**

A continuación se describen los objetivos general y específicos del proyecto.

### **1.7.1. Generales**

El objetivo general es conocer el funcionamiento y los componentes de un turbogenerador, así como los procedimientos utilizados por la empresa para realizar el mantenimiento que asegure un buen funcionamiento.

### **1.7.2. Específicos**

Los objetivos específicos se determinan mediante la inspección del sistema del turbogenerador y equipos utilizados para la generación de energía, mejorar el sistema reparando daños que puedan ser permisibles para posterior funcionamiento.

Comparar los parámetros de temperatura, caudal de vapor y energía generada para determinar posibles daños en función de parámetros.

El objetivo de esta tesis es lograr que todo el personal que está involucrado en la operación del equipo en esta empresa, obtenga los conocimientos y habilidades necesarias, para lograr una estandarización en los procesos operativos y mejorar el control de velocidad del equipo de turbo generación eliminando así los disturbios, reprocesos, pérdidas y posibles accidentes, para lograr una empresa de clase mundial y de alto desempeño.

Estableciendo que una estandarización en los procedimientos operativos es de vital importancia, para obtener invaluable beneficios tanto para el trabajador como para la empresa, siendo así el elemento más importante el recurso humano ya que aun contando con los recursos materiales, capital y tecnología de punta, pero sin la concientización y participación activa del ser humano no será posible lograr cualquier objetivo.

## **2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

### **2.1. Calderas**

Una caldera es un recipiente cerrado a presión en el que se calienta un fluido para utilizarlo por aplicación directa del calor, resultante de la combustión de una materia combustible (sólida, líquida o gaseosa) o por utilización de energía eléctrica o nuclear. Además, se puede decir que una caldera de vapor, es un recipiente cerrado en el cual se genera vapor de agua o de otro fluido para su uso externo. Una caldera es un aparato de transferencia térmica que convierte un combustible (fósil, bagazo, gas, eléctrica o nuclear) a través de un medio de trabajo.

#### **2.1.1. Clasificación de las calderas**

Se clasifican según diversos criterios, relacionados con la disposición de los fluidos y su circulación, el mecanismo de transmisión de calor dominante, aspectos estructurales, modo de intercambio de calor, la forma del quemado del combustible, forma de alimentación del agua y otros muchos factores.

Basándose en algunos de estos criterios las calderas se pueden clasificar en:

- Clasificación de acuerdo a la circulación de los fluidos dentro de los tubos de la caldera:

- Calderas humo tubulares: en estas calderas son los humos los que circulan por dentro de tubos, mientras que el agua se calienta y evapora en el exterior de ellos.

Todo este sistema está contenido dentro de un gran cilindro que envuelve el cuerpo de presión. Los humos salen de la caldera a temperaturas superiores a 70 °C, de forma que se evita la condensación del vapor de agua que contienen, evitando así problemas de formación de ácidos y de corrosión de la caldera. Al evacuar los humos calientes, se producen pérdidas de energía con la consiguiente bajada del rendimiento de la caldera. La caja de humos (colector de humos), es la parte de la caldera donde confluyen los gases de la combustión en su recorrido final, que mediante un tramo de conexión se conducen a la chimenea.

- Calderas acuotubulares: por dentro de tubos circula el agua y la mezcla de agua y vapor. Por fuera, generalmente en flujo cruzado, intercambian calor los humos productos de la combustión. En este tipo de calderas además el hogar (recinto donde se produce la combustión), está conformado por paredes de tubos de agua. En ellas el intercambio es básicamente por radiación desde la llama.

En este tipo de calderas es el agua o fluido térmico que se pretende calentar, es la que circula por el interior de los tubos que conforman la cámara de combustión y que están inmersos entre los gases o llamas producidas por la combustión. El vapor o agua caliente se genera dentro de estos tubos.

- Calderas pirotubulares: en este tipo de caldera el humo caliente procedente del hogar circular por el interior de los tubos gases, cambiando de sentido en su trayectoria, hasta salir por la chimenea.

El calor liberado en el proceso de combustión es transferido a través de las paredes de los tubos al agua que los rodea, quedando todo el conjunto encerrado dentro de una envolvente o carcasa.

A través de este recorrido, el humo, cede gran parte de su calor al agua, vaporizándose parte de esta agua y acumulándose en la parte superior del cuerpo en forma de vapor saturado. Esta vaporización parcial del agua es la que provoca el aumento de la presión del interior del recipiente y su visualización en el manómetro. Su rendimiento global esperado a lo largo de su vida útil no supera el 65 por ciento en el mejor de los casos.

- Clasificación de acuerdo a la presión de trabajo de la caldera
  - Calderas de baja presión: calderas que producen vapor a baja presión, hasta unos 4 o 5 kilogramo por centímetro cuadrado. Este rango de presiones es más común en las calderas de agua caliente que en las calderas que generan vapor.
  - Calderas de media presión: producen vapor hasta aproximadamente 20 kilogramo por centímetro cuadrado. Generalmente vapor saturado, utilizadas en la industria en general.

- Calderas de alta presión: asociadas a ciclos de potencia, trabajan con presiones de  $20 \text{ kg/cm}^2$  hasta presiones cercanas a la crítica.
- Calderas supercríticas: son calderas que trabajan con presiones superiores a la crítica:  $225,56 \text{ ata}$ ,  $374,15^\circ\text{C}$ . Utilizadas en grandes plantas de generación de energía eléctrica, en EEUU y en algunos países de Europa, también hay algunas en Japón.
- Clasificación de acuerdo a la producción de vapor
  - Calderas pequeñas: producen hasta 1 o 2 toneladas de vapor saturado por hora.
  - Calderas medianas: producciones de hasta aproximadamente 20 toneladas de vapor por hora. Las calderas chicas y medianas casi en su totalidad son calderas humo tubulares de baja y media presión.
  - Calderas grandes: calderas que producen desde 20 toneladas de vapor por hora, siendo normal encontrar producciones de 500 y 600 toneladas por hora. Generalmente vapor sobrecalentado, siendo calderas acuotubulares.

## **2.2. Turbinas de vapor**

Turbina de vapor es un motor rotativo que convierte en energía mecánica, la energía de una corriente de agua, vapor de gas o gas. El elemento básico de la turbina es la rueda o rotor, que cuenta con palas, hélices, cuchillas o cubos colocados alrededor de su circunferencia, de tal forma que el fluido en



movimiento produce una fuerza tangencial que impulsa la rueda y la hace girar. Esta energía mecánica se transfiere a través de un eje para proporcionar el movimiento de una máquina, un compresor, un generador eléctrico o una hélice.

### **2.2.1. Tipos de turbinas de vapor**

Existen diferentes tipos de turbinas de vapor, como turbinas esféricas metálicas.

#### **2.2.1.1. Primeras turbinas de vapor**

Históricamente, la primera turbina de vapor de la que se tiene constancia fue construida por Herón de Alejandría alrededor del año 175 A. C., la cual consistía en una esfera metálica con dos toberas en sus polos y orientadas en el mismo sentido por donde escapaba el vapor. La esfera giraba diametralmente, apoyada sobre la caldera por los conductos de entrada del vapor.

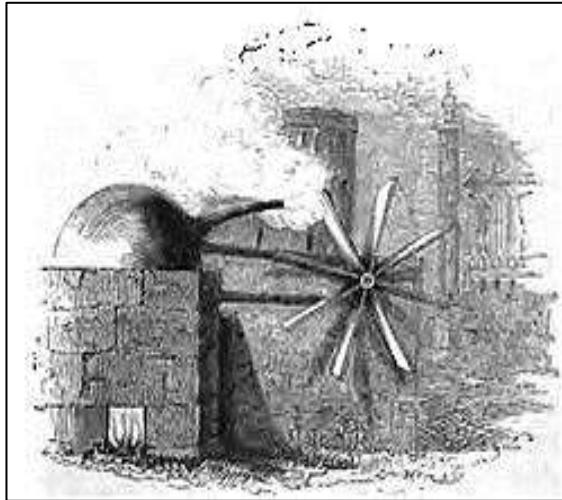
Figura 1. **Esférica metálica con toberas**



Fuente: Kohan. *Manual de calderas*. p. 23.

Hasta 1629 no se tiene constancia de un nuevo diseño independiente de una turbina de vapor, Giovanni Brance utilizó un chorro de vapor para impulsar el giro de una rueda de molino de agua, aunque no logró aplicarlo a ningún uso industrial útil.

Figura 2. **Chorro de vapor**



Fuente: Kohan. *Manual de calderas*. p. 23.

En la turbina de reacción se produce un escalonamiento de velocidad. Este escalonamiento consiste en producir una gran caída de presión en un grupo de toberas y utilizar la velocidad resultante del vapor, en tantos grupos de álabes como sea necesario mediante un juego de enderezadores, reorientando el vapor de salida de la primera etapa para que entre en un segundo rodete.

#### **2.2.1.2. Tipos de turbinas**

A continuación se describe los diferentes tipos de turbinas, entre las cuales están las turbinas monoetapa, multietapa, entre otras.

- Turbina monoetapa: se utilizan para turbinas de hasta 2 millones de vatios de potencia, al ser de más simple construcción son las más robustas y seguras, además de acarrear menores costes de instalación y mantenimiento que las multietapa.

- Turbina multietapa: el objetivo de los escalonamientos en la turbina de vapor es disminuir la velocidad del rodete, conservando una velocidad de los álabes próxima al valor óptimo con relación a la velocidad del chorro de vapor. Si se tiene una presión de vapor muy elevada sin las etapas necesarias, sería necesario que la turbina girase a una velocidad muy alta, que no sería viable mecánicamente por las dimensiones que debería tener el reductor (caja de engranajes que ajustaría la velocidad final del eje a la deseada). Consiguen mejores rendimientos que las monoetapa, además pueden absorber flujos de vapor de mucha mayor presión, por lo que se utilizan para turbinas de alta potencia. Suelen utilizarse turbinas mixtas, con las primeras etapas de acción y las finales de reacción.
- Turbina de flujo axial: es el método más utilizado, el paso de vapor se realiza siguiendo un cono que tiene el mismo eje que la turbina.
- Turbina de flujo radial: el paso de vapor se realiza siguiendo todas las direcciones perpendiculares al eje de la turbina.
- Turbina con extracción de vapor: se realiza en etapas de alta presión, enviando parte del vapor de vuelta a la caldera para sobrecalentarlo y reenviarlo a etapas intermedias. En algunas ocasiones el vapor también puede ser extraído de alguna etapa para derivarlo a otros procesos industriales.
- Turbina de contrapresión: la presión del vapor a la salida de la turbina es superior a la atmosférica, suele estar conectado a un condensador inicial que condensa al vapor, obteniéndose agua caliente o sobrecalentada, que permite su aprovechamiento térmico posterior.

- Turbinas de condensación: el vapor sale a una presión inferior a la atmosférica, en este diseño existe un mayor aprovechamiento energético que a contrapresión, se obtiene agua de refrigeración de su condensación. Este diseño se utiliza en turbinas de gran potencia que buscan un alto rendimiento.

Se denomina grado de reacción a la fracción de la expansión producida en la corona móvil respecto a la total, un grado de reacción indica que la turbina es de reacción pura, mientras que para el valor cero será una turbina de vapor de acción.

- Turbina de vapor de acción: una turbina de vapor de acción con un escalonamiento de velocidad consta fundamentalmente de:
  - Un distribuidor fijo, compuesto por una o varias toberas, cuya misión es transformar la energía térmica del vapor puesta a su disposición, total (acción), o parcialmente (reacción), en energía cinética.
  - Una corona móvil, fija sobre un eje, cuyos álabes situados en la periferia tienen por objetivo transformar en energía mecánica de rotación, la energía cinética puesta a su disposición.

Su funcionamiento consiste en impulsar el vapor a través de las toberas fijas hasta alcanzar las palas, que absorben una parte de la energía cinética del vapor en expansión, lo que hace girar el rotor y con ella el eje al que está unida. Las turbinas de acción habituales tienen varias etapas, en las que la presión va disminuyendo de forma escalonada en cada una de ellas.

La primera aplicación industrial para una turbina de vapor fue patentada en Suecia por De Laval en 1878 y consistía en una máquina centrífuga desnatadora que revolucionó la producción de leche, impulsada por vapor.

El último impulso para la utilización de las turbinas de vapor con fines industriales y comerciales lo dio Charles Algernon Parsons en 1884, con el diseño y construcción de una turbina de vapor de alta velocidad que podía alcanzar hasta 18 000 rpm. A principios del siglo veinte la mayoría de barcos modernos eran ya equipados con este tipo de motor.

En la turbina de reacción se produce un escalonamiento de velocidad. Este escalonamiento consiste en producir una gran caída de presión en un grupo de toberas y utilizar la velocidad resultante del vapor, en tantos grupos de álabes como sea necesario, mediante un juego de enderezadores reorientando el vapor de salida de la primera etapa para que entre en un segundo rodete.

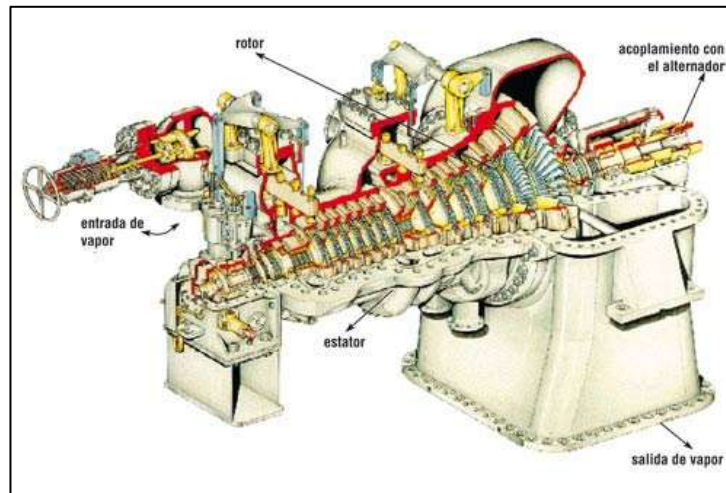
### **2.2.2. Principales elementos de una turbina de vapor**

Las turbinas de vapor tienen una serie de elementos estructurales, mecánicos y auxiliares, como son cojinetes, válvulas de regulación, sistema de lubricación, sistema de refrigeración, virador, sistema de control, sistema de extracción de vahos, de aceite de control y sistema de sellado del vapor.

La turbina se compone de tres partes principales:

- El cuerpo del rotor, que contiene las coronas giratorias de álabes
- La carcasa, conteniendo las coronas fijas de toberas
- Álabes

Figura 3. **Partes de una turbina**



Fuente: Kohan. *Manual de calderas*. p. 34.

- El rotor: el rotor de una turbina de acción es de acero fundido con ciertas cantidades de níquel o cromo para darle tenacidad al rotor, y es de diámetro aproximadamente uniforme. Normalmente las ruedas donde se colocan los álabes se acoplan en caliente al rotor. También se pueden fabricar haciendo de una sola pieza forjada al rotor, maquinando las ranuras necesarias para colocar los álabes.

Los álabes se realizan de aceros inoxidables, aleaciones de cromo-hierro, con las curvaturas de diseño según los ángulos de salida de vapor y las velocidades necesarias. Son críticas las últimas etapas por la posibilidad de existencia de partículas de agua que erosionarían a los álabes. Por ello se fija una cinta de metal satélite soldado con soldadura de plata en el borde de ataque de cada álabe para retardar la erosión.

- La carcasa: la carcasa se divide en dos partes: la parte inferior, unida a la bancada y la parte superior, desmontable para el acceso al rotor. Ambas contienen las coronas fijas de toberas o álabes fijos. Las carcasas se realizan de hierro, acero o de aleaciones de este, dependiendo de la temperatura de trabajo, obviamente las partes de la carcasa de la parte de alta presión son de materiales más resistentes que en la parte del escape. La humedad máxima debe ser de un 10 por ciento para las últimas etapas.
- Normalmente se encuentra recubierta por una manta aislante que disminuye la radiación de calor al exterior, evitando que el vapor se enfríe y pierda energía disminuyendo el rendimiento de la turbina. Esta manta aislante suele estar recubierta de una tela impermeable que evita su degradación y permite desmontarla con mayor facilidad.
- Álabes: los álabes fijos y móviles se colocan en ranuras alrededor del rotor y carcasa. Los álabes se pueden asegurar solos o en grupos, fijándolos a su posición por medio de un pequeño seguro, en forma perno, o mediante remaches. Los extremos de los álabes se fijan en un anillo donde se remachan, y los más largos a menudo se amarran entre sí con alambres o barras en uno o dos lugares intermedios, para darles rigidez.
- Válvula de regulación: regula el caudal de entrada a la turbina, siendo de los elementos más importantes de la turbina de vapor. Es accionada hidráulicamente con la ayuda de un grupo de presión de aceite (aceite de control) o neumáticamente. Forma parte de dos lazos de control: el lazo que controla la velocidad de la turbina y el lazo que controla la carga o potencia de la turbina.



- Cojinetes de apoyo, de bancada o radiales: sobre ellos gira el rotor. Suelen ser de un material blando y recubiertos de una capa lubricante que disminuya la fricción. Son elementos de desgaste, que deben ser sustituidos periódicamente, bien con una frecuencia establecida si su coste es bajo respecto de su producción, o bien por observación de su superficie y cambio cuando se encuentren en un estado deficiente.
- Cojinete de empuje o axial: el cojinete axial, o de empuje impide el desplazamiento del rotor en la dirección del eje. Evitando el empuje axial que sufre el eje por el efecto del vapor repercute en el reductor, dañándolo seriamente. No se encuentra en contacto con el eje sino que hace tope con un disco que forma parte solidaria con el eje.
- El cojinete está construido en un material blando y recubierto por una capa de material que disminuya la fricción entre el disco y el cojinete. Además, debe encontrarse convenientemente lubricado.

Para comprobar el estado de ese cojinete, además de la medida de la temperatura y de las vibraciones del eje, se mide de forma constante el desplazamiento axial. Si se excede el límite permitido, el sistema de control provoca la parada de la turbina o impide que esta complete su puesta en marcha.

- Sistema de lubricación: proporciona el fluido lubricante, generalmente aceite. Para asegurar la circulación del aceite en todo momento el sistema suele estar equipado con tres bombas:

- Bomba mecánica principal: esta acoplada al eje de la turbina, de forma que siempre que este girando la turbina está girando la bomba, asegurándose así la presión de bombeo mejor que con una bomba eléctrica. No obstante, en los arranques esta bomba no da presión suficiente, por lo que es necesario que el equipo tenga al menos una bomba adicional.
- Bomba auxiliar: se utiliza exclusivamente en los arranques, y sirve para asegurar la correcta presión de aceite hasta que la bomba mecánica puede realizar este servicio. Se conecta antes del arranque de la turbina y se desconecta a unas revoluciones determinadas durante el arranque, cambiándose automáticamente de la bomba auxiliar a la bomba principal. También se conecta durante las paradas de la turbina.
- Bomba de emergencia: si se produce un problema de suministro eléctrico en la planta, esta queda sin tensión, durante la parada habría un momento en que la turbina se quedaría sin lubricación, ya que la bomba auxiliar no tendría tensión. Para evitar este problema, las turbinas suelen ir equipadas con una bomba de emergencia que funciona con corriente continua, proveniente de un sistema de baterías.
- Sistema de extracción de vahos: el depósito de aceite suele estar a presión inferior a la atmosférica para facilitar la extracción de vapores de aceite y dificultar una posible fuga de aceite al exterior. Para conseguir este vacío, el sistema de lubricación suele ir equipado con un extractor.

- Sistema de refrigeración de aceite: el aceite en su recorrido de lubricación se calienta modificando su viscosidad, y por lo tanto, sus características lubricantes, llegando a degradarse si el calor es excesivo. Para evitarlo, el sistema de lubricación dispone de unos intercambiadores que enfrían el aceite, estos intercambiadores pueden ser aire-aceite, de forma que el calor del aceite se evacua a la atmósfera, o agua-aceite, de forma que el calor se transfiere al circuito cerrado de refrigeración con agua de la planta.
- Sistema de aceite de control: cuando la válvula de regulación se acciona oleo hidráulicamente, el conjunto de turbina va equipado con un grupo de presión para el circuito de aceite de control. Este debe mantener la presión normalmente entre los 50 y los 200 bares de presión hidráulica. El sistema de control gobierna la válvula de salida del grupo, que hace llegar al aceite hasta la válvula de regulación de entrada de vapor con la presión adecuada.
- Sistema de sellado de vapor: las turbinas de vapor están equipadas con sellos de carbón, que se ajustan al eje, y/o con laberintos de vapor. Con esto se consigue evitar que el vapor salga a la atmósfera y disminuyan la eficiencia térmica de la turbina.
- Virador: el sistema virador consiste en un motor eléctrico o hidráulico (normalmente el segundo) que hace girar lentamente la turbina cuando no está en funcionamiento. Esto evita que el rotor se curve, debido a su propio peso o por expansión térmica, en parada. La velocidad de este sistema es muy baja (varios minutos para completar un giro completo de turbina), pero se vuelve esencial para asegurar la correcta rectitud del rotor. Si por alguna razón este sistema se detiene (avería del rotor,

avería de la turbina, inspección interna con desmontaje) es necesario asegurar que, antes de arrancar, estará girando varias horas con el sistema virador.

- **Compensador:** es el elemento de unión entre la salida de la turbina y el resto de la instalación (generalmente las tuberías que conducen al condensador o el propio condensador), ya que la carcasa de la turbina sufre grandes cambios de temperatura, este elemento de unión es imprescindible para controlar y amortiguar el efecto de dilataciones y contracciones

### **2.3. Ciclo Rankine**

El ciclo de Rankine es un ciclo termodinámico que tiene como objetivo la conversión de calor en trabajo, constituyendo lo que se denomina un ciclo de potencia. Como cualquier otro ciclo de potencia, su eficiencia está acotada por la eficiencia termodinámica de un ciclo de Carnot que operase entre los mismos focos térmicos (límite máximo que impone el Segundo Principio de la Termodinámica). Debe su nombre a su desarrollador, el ingeniero y físico escocés William John Macquorn Rankine.

El ciclo Rankine es un ciclo de potencia representativo del proceso termodinámico que tiene lugar en una central térmica de vapor. Utiliza un fluido de trabajo que alternativamente evapora y condensa, típicamente agua (si bien existen otros tipos de sustancias que pueden ser utilizados, como en los ciclos Rankine orgánicos). Mediante la quema de un combustible, el vapor de agua es producido en una caldera a alta presión para luego ser llevado a una turbina donde se expande para generar trabajo mecánico en su eje (este eje,

solidariamente unido al de un generador eléctrico, es el que generará la electricidad en la central térmica).

El vapor de baja presión que sale de la turbina se introduce en un condensador, equipo donde el vapor condensa y cambia al estado líquido (habitualmente el calor es evacuado mediante una corriente de refrigeración procedente del mar, de un río o de un lago). Posteriormente, una bomba se encarga de aumentar la presión del fluido en fase líquida para volver a introducirlo nuevamente en la caldera, cerrando de esta manera el ciclo.

Existen algunas mejoras al ciclo descrito que permiten mejorar su eficiencia, como por ejemplo sobrecalentamiento del vapor a la entrada de la turbina, recalentamiento entre etapas de turbina o regeneración del agua de alimentación a caldera.

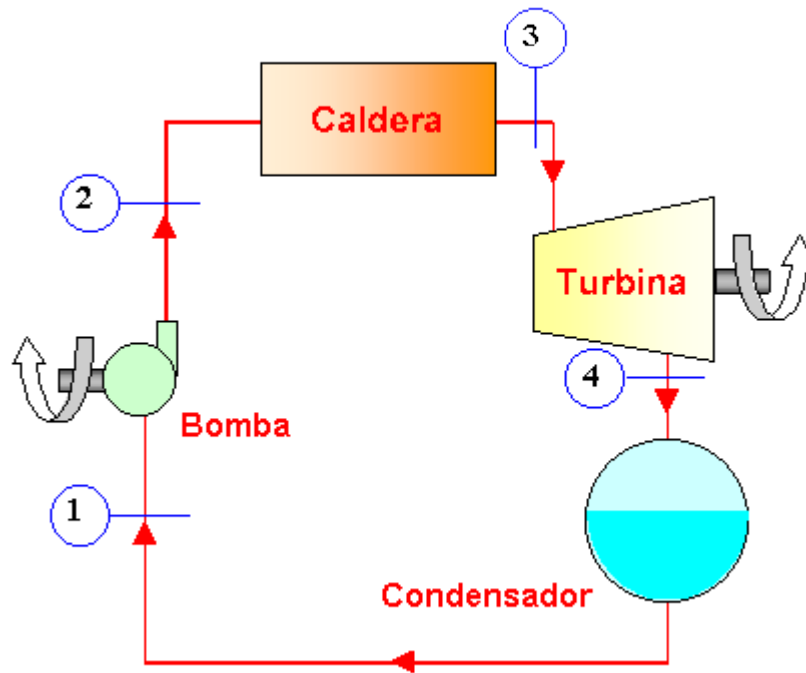
Existen también centrales alimentadas mediante energía solar térmica (centrales termosolares), en cuyo caso la caldera es sustituida por un campo de colectores cilindro-parabólicos o un sistema de helióstatos y torre. Además, este tipo de centrales poseen un sistema de almacenamiento térmico, habitualmente de sales fundidas. El resto del ciclo, así como de los equipos que lo implementan, serían los mismos que se utilizan en una central térmica de vapor convencional.

El diagrama T-s de un ciclo Rankine ideal, está formado por cuatro procesos: dos isentrópicos y dos isobáricos. La bomba y la turbina son los equipos que operan según procesos isentrópicos (adiabáticos e internamente reversibles). La caldera y el condensador operan sin pérdidas de carga y por tanto sin caídas de presión. Los estados principales del ciclo quedan definidos por los números del 1 al 4 en el diagrama T-s (1: vapor sobrecalentado; 2:

mezcla bifásica de título elevado o vapor húmedo; 3: líquido saturado; 4: líquido subenfriado). Los procesos que tienen son los siguientes para el ciclo ideal (procesos internamente reversibles):

- Proceso 1-2: expansión isentrópica del fluido de trabajo en la turbina desde la presión de la caldera hasta la presión del condensador. Se realiza en una turbina de vapor y se genera potencia en el eje de la misma.
- Proceso 2-3: transmisión de calor a presión constante desde el fluido de trabajo hacia el circuito de refrigeración, de forma que el fluido de trabajo alcanza el estado de líquido saturado. Se realiza en un condensador (intercambiador de calor), idealmente sin pérdidas de carga.
- Proceso 3-4: compresión isentrópica del fluido de trabajo en fase líquida mediante una bomba, lo cual implica un consumo de potencia. Se aumenta la presión del fluido de trabajo hasta el valor de presión en caldera.
- Proceso 4-1: transmisión de calor hacia el fluido de trabajo a presión constante en la caldera. En un primer tramo del proceso el fluido de trabajo se calienta hasta la temperatura de saturación, luego tiene lugar el cambio de fase líquido-vapor y finalmente se obtiene vapor sobrecalentado. Este vapor sobrecalentado de alta presión es el utilizado por la turbina para generar la potencia del ciclo (la potencia neta del ciclo se obtiene realmente descontando la consumida por la bomba, pero ésta suele ser muy pequeña en comparación y suele despreciarse).

Figura 4. **Diagrama ciclo Rankine**



Fuente: Kohan. *Manual de calderas*. p. 40.

En un ciclo más realista que el del Rankine ideal descrito, los procesos en la bomba y en la turbina no serían isentrópicos y el condensador y la caldera presentarían pérdidas de carga. Todo ello generaría una reducción del rendimiento térmico del ciclo. El rendimiento isentrópico de la turbina, que representa el grado de alejamiento de una turbina respecto al proceso ideal isentrópico, jugaría un papel principal en las desviaciones al ciclo ideal y en la reducción del rendimiento. El rendimiento isentrópico de la bomba y las pérdidas de carga en el condensador y la caldera tendrían una influencia mucho menor sobre la reducción de rendimiento del ciclo.

En las centrales térmicas de gas se utiliza un ciclo "hermano" del ciclo Rankine ideal: el ciclo Brayton ideal. Este ciclo utiliza un fluido de trabajo que se mantiene en estado de gas durante todo el ciclo (no hay condensación). Además, utiliza un compresor en lugar de una bomba (constructivamente suele ir solidariamente unida a la turbina de gas en un eje común); por otro lado, el equipo donde se produce la combustión no se denomina caldera sino cámara de combustión o combustor. Los equipos utilizados en estas instalaciones son más compactos que los de las centrales térmicas de vapor y utilizan como combustible habitual el gas natural.

Finalmente ambos tipos de ciclos se integran en las centrales térmicas de ciclo combinado, donde el calor rechazado por el ciclo Brayton (en su configuración más simple, el calor es aportado por los gases calientes de la combustión que abandonan la turbina de gas) es utilizado para alimentar el ciclo Rankine (sustituyendo a la caldera).

## **2.4. Combustible**

Al describir el concepto de combustible se puede definir como toda sustancia que emite o desprende energía por combustión controlada (energía química) o excisión nuclear (energía nuclear), capaz de plasmar su contenido energético en trabajo. O también definir como cualquier sustancia capaz de arder en determinadas condiciones (necesitará un comburente y una energía de activación).

Existen varias opciones para el consumo de combustible auxiliar en el período fuera de zafra, algunas ya aplicadas en algunos países y otras en etapas de estudio. En general las posibles variantes son: los residuos agrícolas de caña, que incluyen las hojas y puntas, además de la paja de caña.



- El carbón mineral
- La madera de forestas energéticas

La opción de carbón mineral ya es aplicada en Guatemala para la cogeneración, donde ya se desarrolló la tecnología para la quema alternada de bagazo y carbón mineral en las calderas. La posibilidad de la madera del eucalipto proveniente de las florestas energéticas, como combustibles en centrales azucareras en la época de fuera de zafra.

#### **2.4.1. Tipos**

Existen diferentes tipos de combustibles fósiles como el carbón, bunker; pero también existen combustibles amigables con el ambiente como lo son los biocombustibles.

##### **2.4.1.1. Carbón**

El carbón es un mineral que se origina subterráneamente y es obtenido en un proceso de minería. Hay veces que el carbón se encuentra en la superficie, pero suele ser muy poco común. El carbón se deteriora y puede llegar al autoencendido si no se toman las debidas precauciones. Al deteriorarse, el carbón libera un poco de su materia volátil, reduciendo la potencia calorífica del carbón hasta 3 por ciento en un año, sabiendo que el poder calorífico que posee el carbón está dentro del rango aproximado de 11 600 *british thermal unit* por libra. Además, se reduce la calidad de ignición y también el tamaño del carbón. El deterioro también produce una oxidación lenta del carbón, que puede llegar a autoencenderlo. Para controlar estos aspectos se utilizan ventiladores que remueven el calor y calentamiento del carbón.

Las plantas modernas avanzadas utilizan aleaciones de acero, especialmente desarrolladas para alta resistencia que hacen posible el uso de vapor a condiciones supercríticas y ultra-supercríticas (presiones mayores a 3 596,94 PSI y temperaturas mayores a 1050,8 °F y pueden alcanzar, dependiendo de la localización, cerca del 45 por ciento de eficiencia. Esto conduce a una reducción en las emisiones de CO<sup>2</sup>, porque se usa menos combustible por unidad de electricidad producida.

La combustión de carbón pulverizado (PF) es el método más ampliamente usado para quemar carbón para generación eléctrica. En este método, el carbón es molido, pulverizado e inyectado con aire a la caldera. El carbón pulverizado tiene una gran área superficial, lo cual facilita su combustión en los quemadores.

#### **2.4.1.2. Bunker**

Todos los tipos de petróleo se componen de hidrocarburos, aunque también suelen contener unos pocos compuestos de azufre y de oxígeno; el contenido de azufre varía entre un 1 y un 5 por ciento. El petróleo contiene elementos gaseosos, líquidos y sólidos. La consistencia del petróleo varía desde un líquido tan poco viscoso como la gasolina hasta un líquido tan espeso que apenas fluye. Por lo general hay pequeñas cantidades de compuestos gaseosos disueltos en el líquido; cuando las cantidades de estos compuestos son mayores, el yacimiento de petróleo está asociado con un depósito de gas natural.

Existen tres grandes categorías de petróleos crudos (denominados a veces simplemente crudos): los de tipo parafínico, los de tipo asfáltico y los de base mixta. Los petróleos parafínicos están compuestos por moléculas en las

que el número de átomos de hidrógeno es siempre superior en dos unidades al doble del número de átomos de carbono. Las moléculas características de los petróleos asfálticos son los naftenos, que contienen exactamente el doble de átomos de hidrógeno que de carbono. Los petróleos de base mixta contienen hidrocarburos de ambos tipos.

Dependiendo de su peso relativo los aceites combustibles se dividen en grados. Se pueden producir por destilación fraccionada del petróleo (crudo). Los aceites más livianos, como los de grado Núm. 1 y 2, se conocen como aceites combustibles destilado, mientras que los de grado 4, 5 y 6 (bunker) son más pesados y se conocen como aceites combustibles residuales, siendo para el bunker su poder calorífico de 18 000 BTU/Lb.

El aceite residual combustible de grado Núm. 1 se utiliza en quemadores del tipo vaporizante, y cuando se quema adecuadamente produce un mínimo de residuos. El de grado Núm. 2 (diésel), es un poco más pesado y se fabrica para utilizarse en el transporte pesado y en quemadores del tipo presión atomizadora conocidos como quemadores de pistola. Estos quemadores rocían el aceite en la cámara de combustión donde el vapor del aceite atomizado se mezcla con aire para quemarse. El aceite combustible Núm. 2 es uno de los más usados como combustible para calderas industriales, aunque actualmente se usa en la industria del transporte pesado. El aceite Núm. 4, aunque algunas veces se trata de un destilado del tipo pesado, es generalmente un aceite residual liviano. También se utiliza en quemadores-atomizadores, pero estos están diseñados para funcionar con viscosidad más altas que aquellos que se utilizan con el aceite de grado Núm. 2.

El aceite de grado Núm. 5 (pesado) es aún más viscoso y puede necesitar precalentamiento, dependiendo del clima y del tipo de quipo que se utilice. El de

grado Núm. 6, también conocido como bunker C, es altamente viscoso y si necesita precalentamiento adicional en el quemador entre 165 a 200 °F para ser atomizados.

#### **2.4.1.3. Biocombustibles**

Los biocombustibles siguen siendo sujetos a estudios intensivos como alternativas sustitución del bunker para la cogeneración. La madera, se ha usado como un combustible, es a menudo un subproducto de la industria Aserradera. La madera fresca contiene una humedad del 30 a 50 por ciento, sobre todo en la estructura de célula de la madera, y después de que el aire que seca durante un año, el contenido de humedad reduce de 18 a 25 por ciento. La madera secada por horno contiene la humedad aproximadamente del 8 por ciento. La madera seca puede tener un valor calentador de 8,750 *british thermal unit* por libra El calor requerido para calentar el combustible y se evapora el agua es más de 900 *british thermal unit*. La práctica habitual cuando la madera ardiente debe propulsar las partículas de madera en el horno, por inyectores con el aire precalentado con el objetivo de inducir la alta turbulencia a la caldera.

Además, la madera es inyectada bastante alto en la cámara de combustión, de modo que sea secado y todos excepto las partículas más grandes son quemados antes de que ellos alcancen la parrilla de la caldera.

El bagazo es el material fibroso extraído después de la última extracción que se da en los molinos. El bagazo contiene la humedad aproximadamente del 50 por ciento y es quemada en la manera igual como la madera. La alimentación a las calderas trabaja bajo el mismo mecanismo variando solo la cantidad de alimentación, dependiendo el combustible utilizado en el momento.

Un análisis típico de bagazo seco es del 44,47 por ciento C, la H del 6,3 por ciento, la O del 49,7 por ciento, y la ceniza del 1,4 por ciento. Su poder calorífico es del 8 390 *british thermal unit* por libra.

Los biocombustibles son combustibles que pueden ser añadidos para mantener la combustión estable y proporcionar la energía para la eliminación de humedad. El bagazo por lo general puede suministrar todas las exigencias de combustible, necesarios para mantener la operación dentro del Ingenio para el desarrollo de sus operaciones. Las calderas han sido desarrolladas para quemar todos estos biocombustibles, y algunas preferencias surgen en virtud de características particulares de operaciones.

Además del bagazo, *trash* y la madera, varios combustibles menos conocidos están en el empleo común para la cogeneración de vapor industrial. Aparte de su valor como un combustible, la combustión de desechos reduce al mínimo un problema de disposición molesto que podría tener el impacto ambiental serio. El contenido de ceniza es generalmente bajo, pero mucha humedad podría estar presente del tratamiento, el manejo, y el almacenaje. Sobre una humedad y la base sin ceniza, los valores del poder calorífico pueden ser estimados en 8 000 *british thermal unit* por libra; materiales más resinosos aproximadamente 9 000 *british thermal unit* por libra.



### **3. AHORRO ENERGÉTICO**

Un asunto vital para que las empresas logren consolidarse en el mercado es evitar cualquier fuga de capital. Es por este motivo que se le propone a la empresa Ingenio Tululá la siguiente guía de ahorro energético, no solo para evitar gastos innecesarios que se generen por el mal uso de la energía, sino también para que la empresa tenga una operación más agradable con el medio ambiente.

#### **3.1. ¿Qué es el ahorro energético?**

El ahorro energético supone un ahorro de recursos naturales para salvaguardar al medio ambiente y fomentar un desarrollo sustentable. Consiste en la optimización del consumo de energía, cuyo objetivo es que con un menor consumo se produzcan los mismos resultados finales.

#### **3.2. Medida de ahorro energético**

En el siguiente trabajo de graduación se presenta una selección de las principales medidas de ahorro y eficiencia energética que se puede implementar en la planta, clasificadas en función del equipo o sistemas energéticos sobre las que actúan:

##### **3.2.1. Instalaciones eléctricas**

Muchas de las variaciones que ocurren en la calidad del suministro de energía eléctrica ocurren dentro de las instalaciones del mismo usuario, y están

relacionadas con problemas en el alambrado, dimensionamiento de los conductores y conexiones a tierra. Por eso, para evitarlas, se sugiere lo siguiente:

#### Recomendaciones en instalaciones eléctricas

- Revisar la conexión a tierra de cada equipo que se encuentre en su lugar de trabajo. Si no se cuenta con un sistema de conexión a tierra o bien este no es el más adecuado, efectúe las correcciones del caso; esto le traerá beneficios al equipo y al personal que lo manipula.
- Determinar si el cableado es del tamaño apropiado, ya que la resistencia que este ofrece depende de su sección transversal, además, cada calibre puede manejar cierta cantidad de corriente eléctrica. Un cableado de sección menor al apropiado genera un aumento en las pérdidas de potencia de la línea y un eventual disparo de los interruptores de protección térmica.
- Si se cuenta con un sistema de conexión monofásico trifilar o un sistema trifásico, verificar que posea una distribución adecuada de las cargas por cada una de las fases (trifásico) o entre el retorno y el vivo en el sistema monofásico; esto le evitará un desbalance en el sistema y una circulación de corrientes indeseables por el neutro, lo que podría ocasionarle daños a sus equipos.
- Si se cuenta con un sistema de distribución interno, verifican la capacidad de sus transformadores con la carga instalada, además, de que los conductores de acometida sean los más adecuados; esto evitará pérdidas por calentamiento en los conductores y en el transformador, así como, el disparo del mismo y hasta su posible destrucción.



### **3.2.2. Motores eléctricos**

Los mejores ahorros de energía eléctrica se obtienen cuando el motor y su carga operan a su máxima eficiencia. Algunas recomendaciones sobre eficiencia energética en motores son las siguientes:

- Corregir la caída de tensión o voltaje en los alimentadores a la tensión nominal de operación. Las normas permiten una caída máxima del 3 por ciento (o del 5 por ciento para la combinación de alimentador y circuito derivado) pero es recomendable que no rebase el 15 por ciento.
- Buscar crear un balance en la tensión de alimentación de los motores trifásicos de corriente alterna. El desequilibrio entre fases no debe excederse en ningún caso del 5 por ciento.
- Utilizar arrancadores a tensión reducida en aquellos motores que realicen un número elevado de arranques.
- Elegir correctamente la potencia del motor. El rendimiento máximo se obtiene cuando este opera entre el 75 y el 95 por ciento de su potencia nominal.
- Seleccionar el motor de acuerdo con su ciclo de trabajo. Operar un motor para servicio continuo, en accionamientos de operación intermitente, con frecuentes arranques y paradas, ocasiona una depreciación de sus características de operación y eficiencia. Además de que se puede dañar el aislamiento de los devanados por la elevación de la temperatura.

- No operar los motores a frecuencias nominales distintas a las indicadas en la placa del fabricante.
- Determinar si el equipo está generando vibraciones o ruidos excesivos; buscar suciedad en el motor que pueda causar un mal funcionamiento, aumentar la fricción o dañar el motor.
- No someter el motor a ciclos de trabajo para los cuales no está diseñado. Generalmente, estos se basan en los tipos de aislamiento del motor y la potencia de disipación.

### **3.2.3. Iluminación**

La iluminación podría representar entre el 10 y 15 por ciento de la energía consumida por una industria, y cerca de un 41 por ciento para el sector comercial. De lo anterior la importancia de tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Utilizar sistemas de iluminación fluorescentes, que sean más eficientes y que produzcan una reducción de costos en energía y mantenimiento.
- En exteriores tales como estacionamientos, áreas grandes, alumbrado público, entre otros, utilizar iluminación preferiblemente del tipo de sodio de alta presión o halogenuros metálicos; esto ayudará a tener bajos consumos eléctricos, altos niveles de iluminación y una mayor vida útil de las luminarias, además por supuesto, de bajos costos de mantenimiento.
- Sustituir los fluorescentes tubulares convencionales T-12 por sistemas eficientes del tipo T-8, o del tipo T-5 (que ya está en uso en Europa y Norteamérica). Lo anterior incluye la utilización de balastros electrónicos,

difusores y reflectores de alta eficiencia. Incluso con esto, se pueden lograr ahorros hasta del 60 por ciento, por cada lámpara reconvertida o sustituida.

- Previo análisis costo-beneficio, se recomienda la instalación de controles automáticos de luz, como los sensores infrarrojos, sónicos u otros; especialmente en pasillos, salas de reuniones y bodegas.
- Aprovechar al máximo la luz natural, mediante la instalación de tragaluces.
- Individualizar interruptores en áreas de denso número de luminarias, tratando de dividir el área en sectores de trabajo.
- Sustituir las bombillas incandescentes tradicionales por fluorescentes compactos, en aquellas áreas de donde la luz se utilice más de 4 horas diarias.

#### **3.2.4. Computadoras**

El consumo de electricidad del equipo de cómputo, representa un 34 por ciento del gasto total de electricidad de un edificio de oficinas, por eso:

- Cuando no se utilicen los equipos, como el PC, escáner, o impresora, entre otros, por un tiempo prolongado, no olvidar que la mejor forma de ahorrar energía es apagándolos.

- Para pausas cortas, apagar el monitor de su computadora, el cual es el responsable de la mayor parte del consumo energético del PC. Se ahorrará energía y evitará tener que reiniciar todo el equipo.
- Si requiere sustituir el monitor hacer por un monitor plano (LCD).
- Utilizar funciones de ahorro que incluye Windows o el sistema operativo que el equipo utilice. Este sistema permite que el ordenador se apague automáticamente cuando detecta que no se está usando.
- Programar el protector de pantalla en modo vacío o pantalla negra.

### **3.2.5. Aire acondicionado**

Los sistemas de aire acondicionado más comunes son las unidades de ventana y los sistemas tipo Split. Por ejemplo, para algunos sectores, el aire acondicionado podría representar entre un 30 y 35 por ciento de la energía total consumida. Estas recomendaciones son importantes:

- Adquirir equipos con la más alta relación de eficiencia energética del mercado, ya que, entre más alto sea su ERR, más eficiente será la unidad de aire acondicionado.
- Mantener la temperatura del termostato en 22 °C; es suficientemente confortable y evita la exposición de personal a cambios bruscos de temperatura.
- Limpiar los filtros de aire una vez por semana.

- Procurar que el equipo esté en óptimas condiciones de funcionamiento. Programar una revisión técnica especializada por lo menos dos veces al año.
- Considerar la posibilidad de usar ventiladores eléctricos para mantener un ambiente cómodamente fresco la mayor parte del tiempo. Buscar la manera de aprovechar la ventilación natural.
- No exigir una temperatura muy fría al aire acondicionado al momento de ponerlo en marcha, ya que no refrescará el ambiente rápidamente, solo causará un gasto mayor de energía.
- No enfriar ni calentar áreas donde no hay nadie. Apagar los equipos acondicionadores cuando no haya gente que aproveche el *comfort* que brindan.
- Concientizar al personal acerca de ello.
- Algunos otros equipos eléctricos de alto consumo muy comunes en los sectores industriales y que representan importantes focos de consumo de energía son considerados seguidamente, además de mencionar las recomendaciones básicas para su uso eficiente.

### **3.2.6. Compresores**

El compresor es una máquina eléctrica que toma el aire del ambiente, lo almacena y presuriza; este aire comprimido almacena y transmite energía para el uso de diversos equipos y máquinas que lo convierten en trabajo útil. Muchas veces los compresores se encuentran en un completo descuido; esto causa un

mal rendimiento y un elevado costo de operación, tanto en el mantenimiento como en facturación energética.

Para tener un buen funcionamiento de un compresor es necesario tener presente las siguientes recomendaciones:

- Establecer un programa de mantenimiento preventivo revisando filtros, reparando fugas, entre otros.
- Colocar el compresor lo más cerca posible de los puntos de consumo; aumentando los diámetros de las tuberías y eliminando las fugas se logrará reducir las pérdidas por fricción.
- La capacidad de los compresores debe ser adecuada y la presión de ellos debe ser lo menor posible, para ello se debe verificar que las válvulas utilizadas permitan presiones bajas de funcionamiento.
- Verificar que el ajuste de la presión sea un poco más alto que la correspondiente a las demandas del equipo; esto para compensar las caídas de presión que hubiere en las líneas de distribución.
- Apagar el compresor si no se usa y eliminar las líneas de distribución innecesarias.

### **3.2.7. Sistemas de bombeo**

Un sistema de bombeo se compone de una bomba, un motor, tuberías y accesorios. La energía eléctrica consumida depende de la potencia, el tiempo en que funciona la bomba y la eficiencia del sistema (la potencia suministrada

por la bomba está en función del gasto y de la carga). Si cualquiera de los elementos de la carga ha sido mal seleccionado en cuanto al tipo, capacidad o material o si el motor no funciona correctamente o alguno de los accesorios está obstruido o si la tubería está deteriorada, aumentará el consumo de energía eléctrica total del sistema. Para evitar lo anterior se dan las siguientes recomendaciones:

- Revisar periódicamente los filtros de la bomba.
- Verificar que no haya fugas en los empaques internos.
- También, verificar periódicamente el estado de la tubería para que no existan fugas, en especial en las uniones de los tramos de la tubería.
- La potencia nominal del motor debe ser igual a la requerida por la bomba para trabajar a la máxima eficiencia.
- El motor debe estar perfectamente alineado con la bomba y montado sobre una superficie que reduzca las vibraciones.
- Usar controles automáticos para arrancar el motor de la bomba, así se evita el funcionamiento del motor cuando la bomba ha dejado de funcionar.

### **3.2.8. Buena práctica de consumo energético**

Todas las medidas y actuaciones recogidas en este capítulo son necesarias y constituyen un primer paso importante para que la empresa pueda alcanzar sus objetivos de ahorro y mejora de la eficiencia energética. Pero sin la

conciencia y la colaboración activa de todos los empleados sobre las ventajas de poner en marcha esta iniciativa, será muy difícil alcanzar en la práctica, los objetivos de reducción del consumo de energía.

La información, educación y sensibilización será una herramienta de vital importancia, para garantizar la correcta operatividad de la guía de mejora de la gestión energética de la empresa.

Que el plan sea un éxito dependerá en gran medida de:

- El correcto uso que se haga de los sistemas de iluminación, climatización y los equipos eléctricos e industriales.
- El cambio de los hábitos de consumo de los empleados y operadores.



## **4. FASE DE SERVICIO TÉCNICO PROFESIONAL**

### **4.1. Descripción general**

Para la fase de servicio técnico profesional, se describen los requerimientos de la turbina.

- Potencia: 2,5 MW
- Presión del vapor: 850 PSI
- Temperatura: 750 °F
- Número de etapas: 16 etapas
- Extracciones automáticas: etapas 8 y 12
- Presión de extracciones: 178,5 y 34,3 PSI Respectivamente
- Año fabricación: 1963

### **4.2. Averías principales**

Los principales problemas que pueden presentarse en una turbina de vapor se indican a continuación:

- Alto nivel de vibraciones.
- Desplazamiento excesivo del rotor por mal estado del cojinete de empuje o axial.
- Fallos diversos de la instrumentación.
- Vibración en reductor o alternador.
- Fuga de vapor.
- Funcionamiento incorrecto de la válvula de control.

- Dificultad o imposibilidad de la sincronización.
- Bloqueo del rotor por curvatura del eje.
- Gripaje del rotor.

La vibración en una turbina de vapor no es una avería en sí misma, sino un síntoma de un problema que existe en la máquina y que puede derivar en graves consecuencias. Por esta razón, las turbinas de vapor están especialmente protegidas para detectar un alto nivel de vibraciones y provocar la parada, esta antes de que lleguen a producirse graves daños.

La vibración tiene muy diversas causas, por lo que cuando se presenta se hace necesario estudiar cuál de ellas está provocando el fenómeno, para, por supuesto, corregirlo.

La vibración se hace especialmente evidente durante el proceso de arranque, ya que durante este período se atraviesan una o varias velocidades críticas de la turbina, velocidades en las que la vibración, por resonancia molecular, se ve notablemente amplificada. Es un error muy habitual no estudiar y corregir el problema que está provocando ese anormalmente alto nivel de vibraciones y limitarse a tomar alguna medida puntual que facilite el arranque; los daños que pueden producirse pueden llegar a ser muy altos. Normalmente, detrás de una avería grave de turbina suele estar una negligencia grave de operación y/o mantenimiento.

Las once causas más habituales que provocan un alto nivel de vibración son las siguientes:

- Mal estado de los sensores de vibración o de las tarjetas acondicionadoras de señal. Es posible que lo que se esté considerando

como una vibración sea en realidad una falsa señal, que tenga como origen el mal funcionamiento del sensor encargado de detectarlo. Cuando se produce un disparo por altas vibraciones es conveniente estudiar detenidamente la gráfica de vibraciones del sensor que ha provocado el disparo del período anterior a este (quizás 2-4 horas antes).

Una indicación del mal estado de un sensor suele ser que el aumento de vibración no se produce de forma gradual, sino que en la gráfica se refleja un aumento momentáneo muy alto de la vibración. Mecánicamente es muy difícil que este fenómeno se produzca (el aumento instantáneo del nivel de vibración), por lo que si esto se observa, probablemente sea debido a una señal falsa provocada por el mal estado del sensor o por la influencia de un elemento externo que está provocando una alteración en la medición.

- Desalineación entre turbina y caja de engranajes desmultiplicadora (reductor). Es la causa de al menos el 20 por ciento de los casos de altos niveles de vibración en turbina. A pesar de que el acoplamiento es elástico y en teoría soporta cierta desalineación, casi todos los fabricantes de acoplamientos elásticos recomiendan alinear este como si fuera un acoplamiento rígido. Es importante respetar las tolerancias indicadas por los fabricantes, tanto horizontales como verticales, con el reductor.
- También hay que tener en cuenta que la alineación en caliente y en frío puede variar. Por ello, es necesario realizar una alineación inicial en frío, preferentemente con un alineador láser (por su precisión) y realizar después una alineación en caliente para ver la variación. Si en esta segunda es necesario corregir algo, es conveniente anotar la

desalineación que es necesario dejar en frío (en el eje horizontal y/o en el eje vertical) por si en el futuro hay que realizar un desmontaje y es necesario repetir estas alineaciones.

- Mal estado del acoplamiento elástico entre turbina y desmultiplicador. Es conveniente realizar una inspección visual periódica del acoplamiento (al menos una vez al año) y vigilar sobre todo la evolución de las vibraciones.
- Mal estado del acoplamiento desmultiplicador-alternador. Este es un caso típico de vibración inducida por un equipo externo a la turbina pero unido a ésta. La vibración no es realmente de la turbina, sino que proviene de una causa externa. Igual que en el caso anterior, es conveniente realizar inspecciones visuales periódicas del acoplamiento y vigilar la evolución del nivel de vibración.
- Vibración del alternador o del desmultiplicador, que se transmite a la turbina. Es otro caso de vibración detectada en la turbina pero proveniente de un equipo externo a esta. La vibración en el alternador o en desmultiplicador se verá más adelante.
- Problema en la lubricación de los cojinetes, que hace que el aceite de lubricación no llegue correctamente (en caudal o en presión) a dichos cojinetes. Hay que diferenciar los problemas relacionados con caudal y presión con los problemas relacionados con la calidad del aceite. En referencia a los primeros, la obstrucción de los conductos por los que circula el aceite, el mal estado de los filtros y una avería en las bombas de lubricación (recordemos que una turbina suele llevar varias: una bomba mecánica cuya fuerza motriz la proporciona el propio eje de la

turbina; una bomba de pre lubricación, eléctrica, para arranques; y una bomba de emergencia, que se pone en marcha ante un fallo eléctrico).

Al ser la cantidad de aceite insuficiente, la posición del eje y el cojinete varían de forma cíclica, dando lugar a la vibración. En casos más graves, el eje y el cojinete se tocan sin película lubricante, que provoca una degradación del eje de forma bastante rápida.

- Mala calidad del aceite. El aceite lubricante, con el tiempo, pierde algunas de sus propiedades por degradación de sus aditivos y se contamina con partículas metálicas y con agua. La presencia de agua, de espumas, la variabilidad de la viscosidad con la temperatura, el cambio de viscosidad en un aceite degradado suelen ser las causas que están detrás de una vibración provocada por la mala calidad del aceite. De ellas, es la presencia de agua la más habitual, por lo que el análisis periódico del aceite, el purgado de agua y la reparación de la causa que hace que el agua entre en el circuito de lubricación son las mejores medidas preventivas.
- Mal estado de cojinetes. Los tres cojinetes de los que suele disponer una turbina de vapor de las usadas en plantas de cogeneración (delantero, trasero o de empuje o axial) sufren un desgaste con el tiempo, aún con una lubricación perfecta. Estos cojinetes están recubiertos de una capa de material antifricción, que es la que se pierde. Por esta razón, es necesario medir periódicamente las holguras entre eje y cojinetes y el desplazamiento del eje, para comprobar que los cojinetes aún están en condiciones de permitir un funcionamiento correcto de la turbina. Estas tolerancias están indicadas siempre en el libro de operación y mantenimiento que el fabricante entrega, y es necesario respetar los

intervalos de medida de estas holguras y el cambio si esta comprobación revela la existencia de un problema.

- El adecuado mantenimiento del sistema de lubricación contribuye de una manera innegable a alargar la vida de estos cojinetes, y de la misma forma, un mantenimiento incorrecto del aceite, sus presiones y sus caudales provocan una degradación acelerada de estos.
- Mal estado del eje en la zona del cojinete. Si una turbina ha estado funcionando con el aceite en mal estado, o con una lubricación deficiente, es posible que sus cojinetes estén en mal estado, pero también es posible que hayan terminado por afectar al eje. Si uno y otro rozan en algún momento, es posible que este último presente arañazos o marcas que provocarán vibraciones y pueden dañar el nuevo cojinete.
- En caso de detectarse daños en el eje, es necesario repararlos, con un lijado, un rectificado *in situ* o en taller, aporte de material, entre otros. La mejor forma de prevenir este daño es análisis periódico de la calidad del aceite, su sustitución en caso necesario, el adecuado mantenimiento del sistema de lubricación, y la sustitución del cojinete cuando se detecta que la holgura supera los límites indicados por el fabricante o cuando una inspección visual de este así lo aconseja.
- Desequilibrio del rotor por suciedad o incrustaciones en álabes. El desequilibrio es la causa más habitual de vibraciones en máquinas rotativas, representando aproximadamente un 40 por ciento de los casos de vibración. Un tratamiento químico inadecuado del agua de caldera y del vapor que impulsa la turbina termina dañando no solo esta, sino también el ciclo agua-vapor y la propia caldera. El tratamiento químico

del agua de caldera es tan importante como el control del aceite de lubricación: sin estos dos puntos perfectamente resueltos es imposible mantener adecuadamente una instalación de cogeneración equipada con una turbina de vapor.

- El primer problema que se manifestará por un tratamiento químico inadecuado será la presencia de partículas extrañas depositadas en los álabes de la turbina. Como esta deposición no se hará nunca por igual en todos los elementos rotativos, el rotor presentará un desequilibrio que se traducirá en alto nivel de vibraciones. Las incrustaciones en los álabes de la turbina pueden estar provocadas por niveles inadecuados de carbonatos, sílice, hierro, sodio u otros metales. Para eliminarlas, será necesaria una limpieza de los álabes, que en ocasiones severas puede significar un chorreado de este. Posteriormente a la limpieza, será necesario realizar un equilibrado dinámico de la turbina.
- Desequilibrio en el rotor por rotura de un álabe. No es frecuente, pero si una partícula extraña entra la turbina y golpea un álabe puede provocar una pérdida de material o un daño que afectará al equilibrado del rotor. Para evitarlo, se colocan unos filtros que retienen objetos de cierto tamaño que puedan estar en circulación por las tuberías de vapor. Si este filtro está dañado o se ha retirado, partículas grandes podrían dañar los álabes.
- La reparación significa sustituir los álabes dañados, realizar una limpieza interior de la turbina y equilibrar. Se trata de una avería cara. Para evitarla, hay que asegurarse de que no puede desprenderse ningún elemento que pueda estar en circulación por las tuberías de vapor y que el filtro de vapor se encuentra en condiciones de realizar perfectamente

su función. Es conveniente realizar inspecciones visuales con la un boroscopio o endoscopio, para poder observar el estado de la superficie de los álabes sin necesidad de desmontar la carcasa de la turbina (ver apartado dedicado al mantenimiento predictivo).

- En otras ocasiones el daño en álabes puede estar provocado por roce entre estos y partes fijas de la turbina. En estos casos el origen del fallo pudo ser el mal estado de cojinetes de apoyo o de empuje que hicieron que la posición del eje rotor estuviera fuera de su especificación. El síntoma que revela que está habiendo un problema es un alto nivel de vibración. Si se detecta un nivel de vibración elevado y aun así se mantiene la turbina en marcha, se está dejando la puerta abierta a que se produzca este grave fallo.
- Desequilibrio en rotor por mal equilibrado dinámico, o por pérdida o daño en algún elemento que gira (tornillos, arandelas, tuercas). El desequilibrio puede ser un fallo de origen (el equilibrado inicial de la turbina fue deficiente) o puede ser un fallo sobrevenido. En ese segundo caso, es importante que al efectuar reparaciones en el rotor de la turbina no quede ningún elemento sin montar o montado de forma inadecuada. Es incluso conveniente numerar los tornillos y arandelas que se desmontan para montarlos exactamente igual. Si es el eje el que está dañado, hay que reparar el daño aportando material, rectificando, limpiando, lijando, entre otros. Es conveniente tener un espectro de vibraciones desde la puesta en servicio del equipo. Este primer espectro será de gran utilidad y siempre será una referencia para saber si hay problema inicial o sobrevenido.



- Curvatura del rotor debido a una parada en caliente con el sistema virador parado. Las turbinas de vapor están equipadas con un sistema virador que facilita que el eje no se curve cuando está caliente. La misión de este sistema es redistribuir los pesos uniformemente sobre el eje de rotación, y evitar curvaturas que desequilibrarían el rotor. Si la turbina se para en caliente y el sistema virador no entra en marcha es posible que el eje se curve hacia arriba. El problema se detecta siempre al intentar arrancar, y comprobar que el nivel de vibración es más alto del permitido. Si es así, la solución más adecuada es mantener la turbina girando sin carga y a una velocidad inferior a la nominal durante varias horas. Transcurrido ese tiempo, si esta es la causa del problema, la vibración habrá desaparecido y volverá a valores normales.
- Eje curvado de forma permanente: el eje puede estar curvado de forma permanente, es decir, con una deformación no recuperable siguiendo el procedimiento indicado en el apartado anterior. No es fácil que esto suceda después de la puesta en marcha inicial de la turbina y habitualmente se debe a un fallo preexistente, y que proviene del proceso de fabricación. Es habitual que el equilibrado dinámico haya enmascarado el problema, aunque en el espectro inicial de vibración, el que es recomendable realizar el inicio de la operación del equipo, es seguro que estará presente.
- Fisura en el eje: en ocasiones, un defecto superficial del eje avanza y termina convirtiéndose en una fisura o grieta, que provoca un desequilibrio en el eje. Puede ocurrir por un defecto de fabricación del eje (lo más habitual) o puede estar relacionado con corrosiones que el rotor puede estar sufriendo. Cuando esto ocurre, se detecta a través del análisis de vibraciones, y en la mayoría de los casos son visibles a

simple vista o con ayuda de algún elemento de aumento. La solución suele ser cambiar el eje del rotor, aunque en algunos casos es posible la reparación en empresas especializadas en este tipo de trabajos en metales especiales, mediante saneamiento, aportación de material, rectificado y tratamiento de alivio de tensiones. Será necesario volver a realizar un equilibrado del eje. Como medida preventiva para evitar corrosiones que convierten un defecto superficial en una grieta o fisura, está el control químico del vapor a turbina.

- Corrosión o incrustaciones en el eje, álabes: si el acondicionamiento del vapor no ha sido el adecuado, pueden producirse corrosiones en los álabes o deposiciones de materiales extraños a la turbina en estos. Estas incrustaciones y corrosiones desequilibran la turbina al modificar el reparto de pesos a lo largo del eje de rotación. Cuando esto se produce la solución es la limpieza del conjunto rotor por chorreado o por limpieza mecánica. Habitualmente hay que extraer el rotor y realizar esta limpieza fuera de la turbina. En caso de incrustación, es conveniente tomar muestras de los materiales depositados y analizarlos, para conocer el origen de las partículas extrañas y tomar las medidas correctoras oportunas. Una vez limpiado el eje, será necesario equilibrarlo de nuevo. La mejor medida preventiva es realizar un cuidadoso control químico en el agua de aportación, en el desgasificador, en los condensados, en el agua del calderín y en el vapor.
- Presencia de agua o partículas en el vapor: si el vapor a la entrada a turbina tiene partículas de agua líquida, el choque de las gotas contra la turbina puede provocar vibraciones y desequilibrios. El vapor puede contener agua líquida por fallo en el sobrecalentamiento, por una atemperación excesiva, porque la válvula de atemperación esté en mal

estado, o porque en el camino entre la válvula de atemperación y la entrada a turbina sufra un enfriamiento anormal. Si esto se produce es necesario detectarlo y corregirlo cuando antes, pues provocará una erosión en los álabes de la turbina y se dañarán. El análisis de vibración y las inspecciones boroscópicas ayudarán en la tarea de detección temprana del problema. La solución consiste inevitablemente en corregir el problema que esté causando la presencia de agua en el vapor.

- Defecto en la bancada: una bancada mal diseñada o mal ejecutada pueden provocar vibración. Cuando se detecta una vibración, es conveniente en primer lugar verificar el estado de la bancada, intentando descubrir grietas, falta de material, entre otros. Si la vibración está presente desde la puesta en marcha y se han descartado otras causas, es muy probable que el problema esté relacionado con el diseño o con la ejecución de la bancada. La solución en este caso, será revisar el diseño de la bancada y si es este el correcto, volver a ejecutarla.
- Defecto en la sujeción a la bancada: apesar de que la bancada pueda estar bien ejecutada, la turbina puede no estar convenientemente sujeta a esta. Esto puede ocurrir porque los tornillos de sujeción no tengan el par de apriete apropiado o porque los tornillos no anclen correctamente a la bancada. Este fallo es mucho más habitual de lo que pueda parecer. Algunos autores denominan a este fallo 'pedestal cojo', y el análisis de vibración revela este fallo con relativa facilidad. Cuando este problema ocurre, se observa que aflojando uno de los tornillos de sujeción (el que causa el problema) el nivel de vibraciones extrañamente disminuye.

### **4.3. Mantenimiento de la turbina**

A continuación se describen los pasos a realizar para el mantenimiento de la turbina.

#### **4.3.1. Desmontaje**

Es importante llevar a cabo procedimientos ordenados para desmontar y desmantelar los equipos industriales. En este caso, se llevaron a cabo los siguientes procedimientos para el correcto desmontaje de la turbina de vapor, que asegura desmontar sin dañar ninguna parte o equipo:

##### **4.3.1.1. Aislante térmico**

Se retira el material aislante utilizado para conservar la temperatura en toda la turbina, este material está colocado en la superficie de la turbina, y evita que la temperatura se disperse en el ambiente. El aislante está soportado por unos alambres para evitar desprendimientos. Para la turbina se utiliza la fibra de vidrio como material aislante.

##### **4.3.1.2. Procedimiento desmontaje**

La carcasa superior fue retirada mediante el calentamiento de los espárragos por medio de un quemador de óxido-acetileno y aire comprimido, que son conducidos mediante un quemador que atraviesa el espárrago, ya que es preferible aplicar calor ya sea para apretar o aflojar los espárragos, que utilizar extensiones de llave o fuerza desmedida que dañe los hilos del espárrago o la carcasa de la turbina.

Figura 5. **Calentamiento del perno**



Fuente: Ingenio Tululá.

El apriete del tornillo puede ser aproximado contando el número de *flats* (lados del hexágono de la tuerca) o fracción de un *flat* que fueron necesarios para aflojar el perno.

El aire comprimido es calentado por la flama del oxi-acetileno y los gases calientes atraviesan el quemador para calentar el espárrago. Los gases retornan en el espacio entre el quemador y el hueco en el espárrago y son ventilados a través de los huecos en el fondo del quemador.

Para una elongación satisfactoria del perno, se debe calentar un período de 7 a 10 minutos. Durante la elongación, la temperatura del perno aumentará aproximadamente 300 °F.

#### **4.3.1.3. Desmontaje válvulas de control principal y carcasa**

Al aflojar todos los espárragos y tuercas que unen la carcasa inferior con la superior, se dispuso retirar los juegos de válvulas mediante el uso de la grúa disponible en el área de cogeneración.

Asegurando los puntos de anclaje y utilizando fajas, se procedió a retirar una a una, los juegos de válvulas para darle mantenimiento y limpieza por separado.

**Figura 6. Manejo de válvula**



Fuente: Ingenio Tululá.

Figura 7. **Válvula de control de vapor**



Fuente: Ingenio Tululá.

Con las válvulas desacopladas de la parte superior de la carcasa de la turbina, se procedió a retirar la carcasa, utilizando cables de alta tensión para soportar el peso elevado. Esto debe realizarse con sumo cuidado para evitar dañar los pernos que sirven de guía para la colocación de la carcasa.

Figura 8. **Carcasa superior de la turbina**



Fuente: Ingenio Tululá.

Con todos los elementos que protegen a la turbina ya desacoplados, se procede con el proceso de inspección y calibración de elementos importantes.



Figura 9.      **Álabes móviles**



Fuente: Ingenio Tululá.

#### **4.3.2.      Estado de álabes**

Con la parte superior de la carcasa ya desacoplada del resto de la turbina, la inspección y limpieza de los álabes móviles es más fácil de realizar para el personal a cargo.

Primero se procedió a limpiar la turbina mediante agua a presión, prestando mayor atención a los discos de las etapas intermedias (discos 9,10,11 y 12). La turbina se encontraba en su mayoría limpia, escasa suciedad.

Figura 10. **Limpieza a presión de álabes y diafragmas**



Fuente: Ingenio Tululá.

Los álabes ya lavados con agua, se revisan uno a uno y en los lugares donde se permite, ya que cabe recordar que no es recomendable girar el eje sin la lubricación y todos los componentes radiales y axiales en su lugar, esto para evitar daños por fricción con los elementos fijos.

Como se observa los álabes móviles tienen cierto desgaste, esto debido al tiempo de operación de la turbina y afectado por el tipo de tratamiento de agua y la condición con la que llega el vapor, pero en general, se concluye que los álabes están en buen estado, eso también es indicio de que el tratamiento de agua aportado al agua de alimentación de la caldera, elimina la mayoría de componentes que representan un peligro para el material de la turbina o de la caldera. Se puede ver también que no hay incrustaciones, no hay rastros de sarro. Todo esto ocurre en las 16 etapas de la turbina, no existe desgaste

significativo que amerite el cambio de un álabe móvil. En general, no se encontraron fallas.

Figura 11. **Estado de álabes móviles etapa de alta presión**



Fuente: Ingenio Tululá.

Figura 12. **Álabes de baja presión**



Fuente: Ingenio Tululá.

#### **4.3.3. Calibración de cojinetes radiales (chumaceras)**

Los cojinetes o chumaceras del eje son esferas asentadas a la mitad, que consisten en una carcasa de hierro fundido con una capa de babbit con agujeros que permiten el flujo de lubricación a través de ellos. La carcasa inferior es sostenida por los extremos atornillados a la carcasa de la turbina.

En la turbina, existen 3 puntos en donde el eje por diseño tiene cojinetes radiales acoplados, para asegurar la lubricación y el giro uniforme del eje. En cada punto las chumaceras tienen un diámetro diferente, estos puntos son:

- Chumacera frontal
- Chumacera intermedia (acople con generador)

- Chumacera trasera (acople excitatriz)

Dado el caso que en la empresa, en el caso de la primera chumacera, se dispone de redundancia de repuestos en algunos equipos, dado esto, se procedió a realizar mediciones del eje y de las chumaceras, para determinar la holgura entre estos y así poder elegir la chumacera que mejor se adapte a los requerimientos. En el caso de la chumacera intermedia y de la trasera, solo se cuenta con una respectivamente, así que en ese caso, solo se realizaron mediciones para asegurar que todo está bajo condiciones aceptables de funcionamiento.

Utilizando un micrómetro, se midió el diámetro del eje en cada punto y utilizando también *plastigage*, se determinó la holgura entre la chumacera y el eje, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla I. **Holgura chumacera 1**

<b>Posición frontal eje (medidas en milésima de pulgada)</b>	
<b># Chumacera</b>	<b>Holgura</b>
1 (Actualmente usada)	7
2	4
3	8
4	8
5	7
6	8
7	10
8	8

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Holgura chumacera 2**

<b>Posición media eje (medidas en milésima de pulgada)</b>	
<b># Chumacera</b>	<b>Holgura</b>
1 (Actualmente usada)	14

Fuente: elaboración propia.

Tabla III.      **Holgura chumacera 3**

<b>Posición media eje (medidas en milésima de pulgada)</b>	
<b># Chumacera</b>	<b>Holgura</b>
1 (Actualmente usada)	11
2	10

Fuente: elaboración propia.

Tras inspección, se determinó que las chumaceras actualmente utilizadas pueden continuar en operación. En dado caso de que la tolerancia fuese mayor a la permitida, se elige otra chumacera si existiera, caso contrario, se puede maquinar la chumacera si las circunstancias así lo requieren.

Figura 13. **Limpieza y calibración de chumacera**



Fuente: Ingenio Tululá.

#### **4.3.4. Cojinete axial**

El empuje axial de la turbina es absorbido por un cojinete de empuje axial, colocado entre el cojinete radial y el sistema de volteo. Este cojinete mantiene a los álabes en posición axial adecuada en relación con las partes estacionarias de la turbina. El collar de empuje (collarín) del rotor gira entre dos platinas de empuje o anillos, que están sostenidos por ambos lados, uno activo (operación), y uno inactivo. Está hecho en 2 partes que van atornilladas junto con unos calces (*shims*) que ayudan a ajustar al cojinete con el rotor de la turbina. El



fabricante recomienda que la holgura axial del rotor sea de 0,005 a 0,010 pulgadas.

Figura 14. **Cojinete axial inactivo**



Fuente: Ingenio Tululá.

Figura 15. **Cojinete axial activo**



Fuente: Ingenio Tululá.

Figura 16. **Collar de empuje axial**

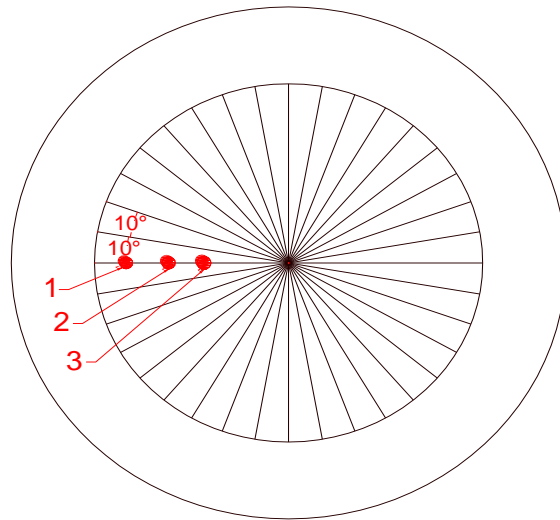


Fuente: Ingenio Tululá.

#### **4.3.5. Comprobación desgaste collar de empuje**

Para comprobar que los cojinetes activos e inactivos no desgasten mucho la superficie del collar del eje, se procedió a realizar una medición entre los 2 puntos de apoyo de los cojinetes, para verificar que el desgaste que existe en la zona de contacto los extremos del collarín y el eje.

Figura 17. **Puntos de medición collar de empuje axial**



Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Desgaste en collar de empuje axial**

	Punto de medición (0,001")		
Angulo	Punto 1	Punto 2	Punto 3
10	3 707	3 707	3 707
20	3 708	3 707	3 708
30	3 708,5	3 709	3 707
40	3 709	3 709	3 708
50	3 708	3 708	3 707
60	3 707,5	3 708	3 706,5
70	3 707	3 706,5	3 707
80	3 706,5	3 707	3 707
90	3 707	3 708	3 707
100	3 707	3 707	3 706
110	3 706	3 706	3706.5
120	3 706,5	3 706	3 706
130	3 706	3 706,5	3 707
140	3 706,5	3 706,5	3 706
150	3 706,5	3 706,5	3 706
160	3 707	3 706,5	3 706
170	3 706,5	3 706,5	3 706,5
180	3 706,5	3 706,5	3 706,5

Continuación de la tabla IV.

Angulo	Punto de medición (0,001")		
	Punto 1	Punto 2	Punto 3
190	3 706	3706	3706
200	3 706	3 706	3 706
210	3 706	3 706	3 706
220	3 706	3 706,5	3 706
230	3 706	3706.5	3 706
240	3 706	3 706	3 706
250	3 706	3 706	3 706
260	3 706	3 706	3 705,5
270	3 706	3 706	3 706
280	3 706	3 705,5	3 706
290	3 705,5	3 706,5	3 706
300	3 706	3 706,5	3 706
310	3 706	3 706,5	3 706,5
320	3 706	3 706,5	3 706
330	3 706	3 706,5	3 706,5
340	3 706	3 706,5	3 706
350	3 706	3 706,5	3 706
360	3 706	3 706,5	3 706

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.6. Desplazamiento axial de la turbina

Para determinar la holgura axial, o juego axial que tiene el eje de la turbina, se procedió a soldar un soporte perpendicular al eje, mostrado en la figura, en los dos extremos de la turbina, en donde va colocado un cilindro hidráulico, que aportará la fuerza necesaria para desplazar en ambas direcciones el eje de la turbina y determinar el desplazamiento axial. Se colocó un reloj comparador en uno de los puntos para verificar la holgura. Como se observa en la figura, el empuje axial es de 0,007 pulgadas, el fabricante recomienda el rango de 0,005 a 0,010 pulgadas.

Figura 18. Soportes y cilindro hidráulico para determinar empuje axial



Fuente: Ingenio Tululá.

Figura 19. **Reloj comparador**



Fuente: Ingenio Tululá.

#### **4.3.7. Sellos laberínticos**

Los sellos están situados a lo largo del eje de la turbina. Estos sellos son necesarios para prevenir fugas de vapor en la turbina, así como también evitar la entrada de aire a la turbina. Los sellos están agrupados y cada grupo de sellos va atornillados a la carcasa de alta presión y adicionalmente los anillos van montados en los sellos para ajustarlos a la carcasa.

Las ranuras de los sellos no requieren demasiada atención, excepto que deben ser inspeccionados los sellos frecuentemente si las condiciones de operación lo permiten. Los anillos con excesivo desgaste deben remplazarse por nuevos. Para esta inspección, se realizó una medición de holguras entre los paquetes de sellos y las ranuras en el eje.



Figura 20. **Sellos de turbina**



Fuente: Ingenio Tululá.

Tabla V. **Holgura de sellos**

<b>Holgura de Sellos (milésimas de pulga)</b>		
	<b>Derecho</b>	<b>Izquierdo</b>
HP1	15	36
HP2	10	35
HP3	8	26
HP4	10	30
HP5	10	50
HP6	25	90
HP7	25	90
D2	16	36
D3	13	18
D4	22	18
D5	38	12
D6	21	30
D7	12	37
D8A	12	47
D8B	10	56
D9	36	15
D10	22	15
D11	10	66
D12A	15	20
D12B	24	33
D13	26	18
D14	Cerrado	32
D15	20	26
D16	Cerrado	63
LP1	16	14
LP2	16	14
LP3	20	11

Fuente: elaboración propia.

#### **4.3.8. Sistema de volteo**

El sistema de volteo, conocido también como *Turning Gear*, es un equipo colocado en la parte frontal del rotor de la turbina. El sistema de volteo ayuda al eje y a maquinaria asociada a rotar a bajas revoluciones por minuto, para asegurar un enfriamiento uniforme del eje. Si no se realiza esta acción, podría ocurrir pandeo o decaimiento a lo largo del eje. Adicionalmente, el sistema de volteo puede ser utilizado para realizar una inspección del eje, engranes reductores, cojinetes y demás elementos de la turbina, si el diseño así lo permite. Como una función auxiliar, el volteo también ayuda a distribuir una capa protectora de lubricante en todos los cojinetes o chumaceras del eje.

Figura 21. **Sistema de volteo**



Fuente: Ingenio Tululá.

- Mantenimiento realizado a motor hidráulico.
- Inspección visual a engranes y gusano que constituyen el sistema de volteo.
- Cambio de tubos de alta presión, por mangueras para alta presión para maniobrar de mejor manera en mantenimientos posteriores por la flexibilidad de las mimas.
- Limpieza y mantenimiento a los sensores de desplazamiento.

#### **4.3.9. Sistema hidráulico**

El sistema hidráulico de alta presión contiene un fluido no flamable que opera a una presión de 1600 PSI. La central hidráulica consiste en dos sistemas de bombas paralelas e independientes diseñadas de tal forma, que una pueda operar mientras la otra bomba está bajo rutinas de mantenimiento o en reparación. Las bombas son de pistones de desplazamiento variable con compensadores de presión. Una reserva del fluido hidráulico forma el centro de todo el equipo hidráulico con cada bomba respectivamente colocada en cada lado de la central.

La unidad hidráulica se utiliza para controlar la operación de la turbina. Provee el fluido bajo presión directamente a las servoválvulas en los vástagos, para accionar el engrane que permite abrir o cerrar las válvulas de vapor e impulsa el sistema de volteo de la turbina.

Figura 22. **Central hidráulica**



Fuente: Ingenio Tululá.

Ya que los equipos que constituyen el sistema hidráulico son en parte bombas e intercambiadores de calor para enfriar el aceite, las acciones a realizar en la central hidroeléctrica fueron las siguientes:

- Inspección y limpieza de los intercambiadores.
- Desmontar y desarmar bomba de aceite, revisión de cojinetes, así como del estado del eje e impulsor.
- Limpieza de los filtros de aceite.

#### **4.3.10. Válvulas de control principal**

El control principal de válvulas permite el paso de vapor a las toberas. Estas válvulas controlan el flujo de vapor que fluye por los conductos de carcasa de la turbina que guían el vapor a las toberas. Los asientos de las válvulas están localizados en la parte superior del cabezal de alta temperatura, y acopladas a vástagos. Por cada válvula, existe una leva que controla el nivel del vástago y a la vez acoplada al eje de levas. El eje de levas es rotado por un piñón que actúa junto con una cremallera que tiene movimiento vertical impulsado por un cilindro hidráulico. El eje de levas es girado por la acción del cilindro hidráulico, las levas en el eje abren y cierran las válvulas en una secuencia predefinida. Cuando el vástago está dentro del cilindro, las válvulas son asentadas por la fuerza de compresión aportada por los muelles.

Las válvulas de control de vapor de entrada deben de estar en perfecto estado, para este efecto, se procedió a realizar una limpieza minuciosa y a realizar una inspección de todos los componentes previamente mencionados, para asegurar que todos los componentes se encuentran en buen estado.

Figura 23. **Válvulas de control principal de vapor**



Fuente: Ingenio Tululá.

Figura 24. **Asiento válvulas**



Fuente: Ingenio Tululá.

La servoválvula montada en la entrada del cilindro hidráulico controla el flujo de entrada, esta envía señales eléctricas recibidas de la consola de control, abre la válvula que mantiene una fuerza balanceada al cilindro para mantener la válvula de entrada de vapor en la posición definida.

Figura 25. **Cilindro hidráulico de control de vapor**



Fuente: Ingenio Tululá.

Además del control de válvula de vapor central, la turbina cuenta con 2 diferentes mecanismos de válvulas de control de vapor, la función de estos mecanismos es elevar o bajar unas válvulas de carrete, controlando el vapor desde la etapa de extracción hacia las etapas posteriores.



#### **4.3.11. Sistema de lubricación**

El sistema de lubricación de la turbina es independiente y consiste en un tanque de aceite, bombas, intercambiadores de calor, tubería, instrumentación y filtros. El adecuado funcionamiento de la turbina depende de una alimentación continua de aceite cumpliendo con la cantidad, temperatura y presión adecuadas.

Es importante que todo el sistema de aceite, incluyendo las chumaceras, esté limpio y libre de suciedad y materiales externos. El aceite utilizado es ISO 32.

El control apropiado de la temperatura del aceite es obtenido a través de un intercambiador de calor. Todo el lubricante pasa a través del intercambiador donde la temperatura es reducida haciendo pasar el lubricante en contacto con tubería transportando agua que enfría el calor, el agua caliente resultante se dirige luego a las torres de enfriamiento y retorna para repetir el ciclo.

La temperatura y presión del aceite son debidamente registrados periódicamente mientras la turbina esté en operación, esto permite detectar temperaturas o presiones que estén fuera del rango recomendado antes de que ocurra una falla. Un aumento de temperatura puede ser provocado por una obstrucción en la tubería.

Se inspecciona también mediante análisis de aceite, que el lubricante no tenga agua, que puede ser debido a tres causas comunes:

- Fuga de agua en el intercambiador

- Fuga de vapor en la turbina hacia el lubricante
- Condensación humedad en el ambiente

Esto se evita también, colocando filtros en la tubería del lubricante.

Figura 26. **Bomba de aceite de lubricación y sus partes**



Fuente: Ingenio Tululá.

- Mantenimiento realizado:
  - Se revisó la bomba sumergible de lubricante. Inspección a elementos: cojinetes, impulsor, empaques, estado del eje.

- Limpieza a los intercambiadores de calor, inspección para verificar si existe obstrucción.
- Limpieza general de todo el tanque.
- Cambio de tubería de acero inoxidable por mangueras de lubricación del sistema de volteo.

#### **4.3.12. Válvula de cierre rápido**

Esta válvula es de tipo cierre rápido y su función primaria es ser disparada para cerrar, ya sea manualmente o por sobre-velocidad de la turbina y otras alarmas. No debe ser considerada una válvula que completamente prevenga al vapor de entrar en la turbina cuando no está en operación. Es por esta razón que las válvulas son diseñadas con asientos relativamente largos para evitar estrés del material. La válvula está completamente abierta cuando el flujo del aceite hidráulico es permitido por la válvula piloto del cilindro hidráulico, que al ser ejercido por la presión hidráulica, eleva el vástago para cerrar la válvula. Por otro lado, la válvula está completamente cerrada cuando la presión hidráulica no es mantenida en el cilindro hidráulico como resultado de falla del sistema hidráulico o aumento de velocidad de la turbina. En el último caso, la válvula piloto de emergencia apaga la alimentación de aceite reduciendo la presión en el cilindro hidráulico, cerrando así la válvula de cierre rápido.

Mantenimiento realizado:

- Cambio de cilindro hidráulico
- Limpieza de regulador de presión
- Inspección y limpieza del muelle que mantiene cerrada la válvula

Figura 27. **Válvula de cierre rápido**



Fuente: Ingenio Tululá.

## CONCLUSIONES

1. Al termino de todas las actividades realizadas, se puede decir que es de suma importancia llevar a cabo mantenimientos previamente programados, para equipos tan importantes y críticos en una central termoeléctrica de un ingenio azucarero, en donde, además de proporcionar el vapor necesario para el proceso de fabricación de azúcar, también es utilizado en turbogeneradores que alimentan la planta de energía eléctrica y también forma parte de venta al mercado.
2. Todos los procesos de mantenimiento descritos en este informe, son en general, el mantenimiento que se le debe dar a una turbina al término de cada zafra, cumpliendo con las especificaciones que da el fabricante, ya sea por asesoramiento o apoyándose en el manual de fabricante, que contiene información importante como las tolerancias permisibles en las diferentes holguras, en chumaceras, cojinetes radiales, entre otros.
3. Al estandarizar el mantenimiento de dichos equipos, se garantiza que todo el personal obedece un orden y un proceso ya establecido para futuros planes de mantenimiento, ya sea para utilizar un historial para evidenciar si el mantenimiento, fue debidamente realizado y si se detectara una falla, sería más posible determinar los cambios que causaron esta posible falla. Este informe describe todo lo realizado en el Ingenio Tululá, obedeciendo un proceso establecido en dicho mantenimiento.



## RECOMENDACIONES

1. Al jefe de maquinaria y equipo: mantener un *stock* de repuestos disponibles, ya que las turbinas de vapor son diseñadas para operar durante períodos largos con vida útil aproximada de 30 a 50 años, por lo que es necesario el remplazo periódico de las principales partes de la turbina, debido al efecto dañino del ambiente en el cual opera el equipo.
2. Al personal de mantenimiento y jefe de maquinaria: seleccionar adecuadamente, entre comprar o modificar elementos de la turbina que deban remplazarse, ya que muchas partes son diseñadas por el fabricante para una aplicación específica, pero componentes estándares también pueden ser utilizados para facilitar la entrega de los materiales y minimizar costos. También existe la posibilidad de rediseñar ciertos componentes de la turbina para mejorar la eficiencia durante el tiempo de vida.
3. Al personal de soldadura así como los ingenieros a cargo: considerar cambios en la estructura metálica de la turbina que pueden ser requeridos por diferentes razones, pueden ser categorizadas en cuatro distintas necesidades: mejorar eficiencia, aumento de rentabilidad (incluyendo extensión de tiempo de vida), rediseño debido a cambios en el proceso y reaplicación y modificación de una turbina para uso diferente al cual fue diseñada. La mejora de eficiencia puede ser requerida y deseada para turbinas antiguas, ya que al ser usada durante largo tiempo, experimenta pérdidas de rendimiento como

resultado en las toberas o en los álabes en los discos. La deterioración siempre ocurre y las tolerancias pueden aumentar.



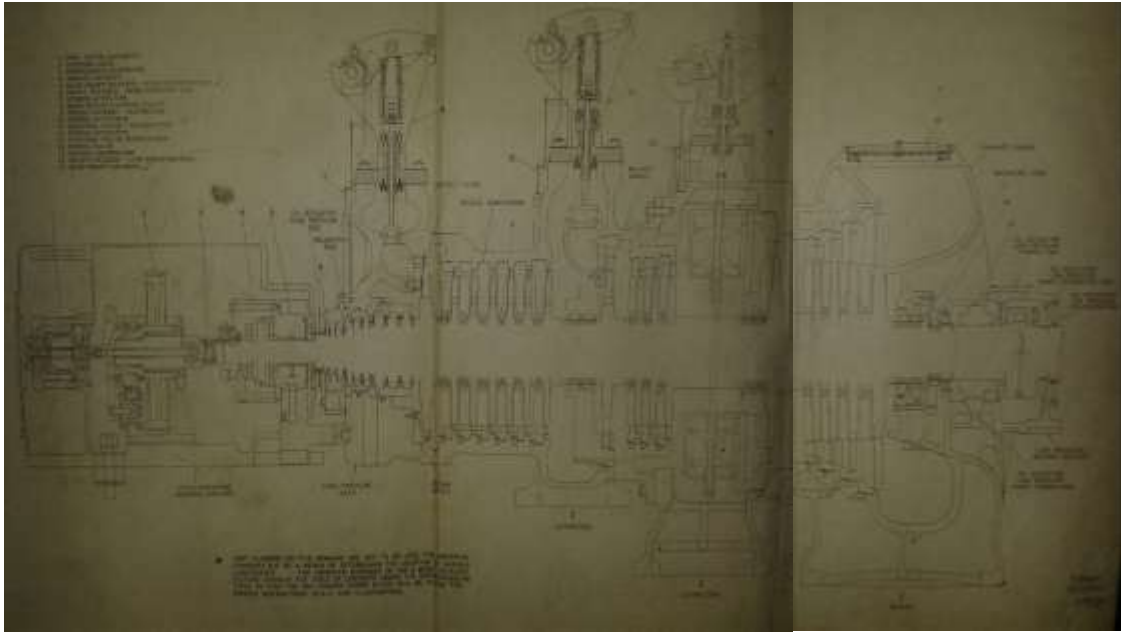
## BIBLIOGRAFÍA

1. AVALONE, Eugene. *Manual del ingeniero mecánico*. México: 9a ed. México: Editorial, 1996 233 p.
2. FINK, Donald. *Manual de ingeniería eléctrica*. 13a ed. Editorial Colombia: 1997. 156 p.
3. HALL, Allen. *Teoría y problemas de diseño de máquinas*. 2a ed. Colombia: Editorial, 1999. 177 p.
4. HUGOT, E. *Manual para ingenieros azucareros*. México: 1984. 188 p.
5. KOHAN, Anthony. *Manual de calderas*. Vol I. España: McGraw Hill, 2008. 199 p.
6. STEVENSON, William. *Análisis de sistema de potencia*. México: 1997. 133 p.



## ANEXOS

**Figura 1. Partes Turbina de vapor**



Fuente: Ingenio Tululá.

